



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

MĚŘENÍ ELEKTRICKÉ REZISTIVITY PŮDY

MEASUREMENT OF ELECTRICAL SOIL RESISTIVITY

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Stanislav Matyska

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Václav Vyčítal

BRNO 2018

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Elektroenergetika**

Ústav elektroenergetiky

Student: Bc. Stanislav Matyska

ID: 154804

Ročník: 2

Akademický rok: 2017/18

NÁZEV TÉMATU:

Měření elektrické rezistivity půdy

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Seznámit se s základní teorií měření rezistivity půdy – Wennerova metoda, jednovrstvý a vícevrstvý model půdy, jeho určení z výsledků měření.
2. Seznámit se s obsluhou přístroje CPC 100 a měřením rezistivity půdy.
3. Seznámit se s programem Ansoft Maxwell a možnostmi simulování daného měření.
4. Provést měření rezistivity půdy pro různá místa měření. Předpokládá se aktivní účast studenta na vyhledávání daných míst.
5. Zpracovat změřená data, porovnat data z měření s daty získanými simulací, popsat vhodnosti/nevhodnosti náhrady jednovrstvého modelu půdy dvouvrstvým pro daná měření atp.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Literatura je stanovena dle pokynů vedoucího práce.

Termín zadání: 5.2.2018

Termín odevzdání: 21.5.2018

Vedoucí práce: Ing. Václav Vyčítal

Konzultant:

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Bibliografická citace práce:

MATYSKA, S. *Měření elektrické rezistivity půdy*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2018. 100 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Václav Vyčítal.

„Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Měření elektrické rezistivity půdy jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.“

Zároveň chci poděkovat všem lidem, kteří mi během studia jakýmkoli způsobem pomohli.

U příležitosti této práce děkuji zvláště Vojtěchu Šimíčkovi, Ing. Janu Najmanovi a Ing. Martinu Appelovi za pomoc při vývoji GUI v Matlabu, dále Ing. Martinu Sýkorovi za zapůjčení měřicího přístroje PU 193, Ing. Leoši Vránovi za poskytnutí pole pro měření, a především vedoucímu této práce Ing. Václavu Vyčítalovi za věnovaný čas a cenné rady.

Nakonec děkuji své rodině za velkou podporu během celého mého studia.

V Brně dne: 21.05.2018

.....

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá měřením elektrické rezistivity půdy. V teoretické části jsou popsány metody, kterými se rezistivita půdy měří – zvláště Wennerova metoda, která byla použita pro praktická měření. Dále je popsán jednovrstvý a dvouvrstvý model této metody. V práci je dále popsán postup měření rezistivity půdy pomocí přístrojů OMICRON CPC 100 a PU 193, které byly použity při měření. Pro ověření modelování dvouvrstvého modelu půdy je v teoretické části práce dále popsán postup modelování půdy za pomoci programu Ansys.

V praktické části práce byla provedena měření ve třech lokalitách: Brno – Královo Pole; Hrušovany nad Jevišovkou – Pravice; Hustopeče nad Bečvou – Vysoká. Naměřené hodnoty byly zpracovány pomocí grafického uživatelského rozhraní (GUI) v programu Matlab, které bylo vyvinuto v rámci této práce. Z těchto hodnot byl pro každou lokalitu a oba měřicí přístroje zvlášť vytvořen vždy alespoň jeden dvouvrstvý model půdy – celkem bylo vytvořeno 12 modelů. Pro tyto modely byla následně simulována měření v Ansysu. Výsledky simulací byly poté zpětně srovnány s naměřenými hodnotami.

Cílem této práce je tedy srovnání naměřených dat s daty získanými simulacemi a následný popis vhodnosti / nevhodnosti náhrady jednovrstvého modelu půdy dvouvrstvým pro daná měření.

KLÍČOVÁ SLOVA: rezistivita půdy; Wennerova metoda; dvouvrstvý model

ABSTRACT

This master's thesis deals with the measurement of the electrical soil resistivity. In the theoretical part there are described the methods by which the soil resistivity is measured – especially the Wenner's method, which was used for the practical measurements. Then there is also described the one-layered and the two-layered model of this method. Furthermore, there is described the procedure for the measurement of soil resistivity using the OMICRON CPC 100 and PU 193 instruments used in the measurement. To verify the modeling of a two-layered soil model, the theoretical part of the thesis describes the soil modeling process using the program Ansys.

As for the practical part of the thesis, the measurements were carried out in three localities: Brno – Královo Pole; Hrušovany nad Jevišovkou – Prácheň; Hustopeče nad Bečvou – Vysoká. The measured values were processed using the Matlab's graphical user interface (GUI) that was developed within this thesis. From these values, at least one two-layered soil model was created for each location and both meters – a total of 12 models were created. For these models, measurements were simulated in Ansys. The results of the simulations were then compared with the measured values.

The aim of this thesis is to compare the measured data with the data obtained by the simulations and subsequently to describe the suitability / unsuitability of the substitution of the one-layered soil model for the two-layered one for given measurements.

KEY WORDS: soil resistivity; Wenner's method; two-layered model

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	8
SEZNAM TABULEK.....	11
SEZNAM ZKRATEK.....	13
1 ÚVOD.....	15
2 REZISTIVITA PŮDY.....	16
3 METODY MĚŘENÍ REZISTIVITY PŮDY.....	18
3.1 WENNEROVA METODA.....	18
3.1.1 JEDNOVRSTVÝ MODEL.....	18
3.1.2 DVOUVRSTVÝ MODEL.....	20
3.2 SCHLUMBERGEROVA METODA.....	25
3.3 OWENSOVA METODA.....	26
3.4 MĚŘENÍ PŘÍMO TYČÍ.....	27
3.5 MĚŘENÍ DLOUHOU TYČÍ.....	28
4 ELEKTROMAGNETICKÉ VLASTNOSTI PŮDY.....	29
4.1 FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ VLASTNOSTI PŮDY.....	29
4.1.1 POVAHA PŮDY.....	29
4.1.2 OBSAH VODY V PŮDĚ.....	29
4.1.3 TEPLOTA PŮDY.....	30
4.1.4 FREKVENCE PROUDU.....	31
4.1.5 STRÍDÁNÍ ROČNÍCH OBDOBÍ.....	32
4.1.6 GEOLOGICKÁ STRUKTURA.....	32
4.1.7 SNÍH.....	32
4.2 MĚRNÁ VODIVOST, RELATIVNÍ PERMITIVITA A PERMEABILITA.....	32
4.2.1 MĚRNÁ VODIVOST.....	33
4.2.2 RELATIVNÍ PERMITIVITA.....	36
4.2.3 RELATIVNÍ PERMEABILITA.....	39
5 MĚŘICÍ PŘÍSTROJE.....	40
5.1 OMICRON CPC 100.....	40
5.1.1 SCHÉMA ZAPOJENÍ.....	40
5.1.2 OVLÁDÁNÍ A NASTAVENÍ.....	41
5.1.3 PRINCIP VÝPOČTU REZISTIVITY.....	42
5.1.4 TECHNICKÉ PARAMETRY.....	43
5.1.5 VÝHODY A NEVÝHODY.....	43
5.2 PU 193.....	44
5.2.1 SCHÉMA ZAPOJENÍ.....	44
5.2.2 OVLÁDÁNÍ A NASTAVENÍ.....	45
5.2.3 PRINCIP VÝPOČTU REZISTIVITY.....	46
5.2.4 TECHNICKÉ PARAMETRY.....	46
5.2.5 VÝHODY A NEVÝHODY.....	47

6 PRAKTICKÝ POSTUP MĚŘENÍ REZISTIVITY PŮDY	48
6.1 PŘÍPRAVA PŘED MĚŘENÍM.....	48
6.2 USPOŘÁDÁNÍ ELEKTROD A POLOHA MĚŘICÍHO STANOVISTĚ.....	49
7 VYTVOŘENÍ DVOUVRSTVÉHO MODELU.....	52
8 SIMULACE DVOUVRSTVÉHO MODELU.....	57
8.1 TVORBA 3D MODELU, NASTAVENÍ A SPUŠTĚNÍ SIMULACE.....	57
8.2 VÝSLEDKY SIMULACE.....	59
9 VÝSLEDKY MĚŘENÍ A SIMULACÍ.....	64
9.1 MĚŘENÍ 1: BRNO – KRÁLOVO POLE.....	64
9.1.1 POLOHA	64
9.1.2 PODMÍNKY PŘI MĚŘENÍ.....	65
9.1.3 NAMĚŘENÉ HODNOTY	65
9.1.4 GUI – DVOUVRSTVÝ MODEL	66
9.1.5 VÝSLEDKY SIMULACÍ	68
9.2 MĚŘENÍ 2: HRUŠOVANY NAD JEVIŠOVKOU – PRAVICE.....	72
9.2.1 POLOHA	72
9.2.2 PODMÍNKY PŘI MĚŘENÍ.....	73
9.2.3 NAMĚŘENÉ HODNOTY	74
9.2.4 GUI – DVOUVRSTVÝ MODEL	75
9.2.5 VÝSLEDKY SIMULACÍ	76
9.3 MĚŘENÍ 3: HUSTOPEČE NAD BEČVOU – VYSOKÁ	81
9.3.1 POLOHA	81
9.3.2 PODMÍNKY PŘI MĚŘENÍ.....	82
9.3.3 NAMĚŘENÉ HODNOTY	83
9.3.4 GUI – DVOUVRSTVÝ MODEL	84
9.3.5 VÝSLEDKY SIMULACÍ	85
10 SROVNÁNÍ JEDNOVRSTVÉHO A DVOUVRSTVÉHO MODELU	89
10.1 JEDNOVRSTVÝ MODEL.....	89
10.2 DVOUVRSTVÝ MODEL	89
11 ZÁVĚR.....	91
POUŽITÁ LITERATURA.....	93
PŘÍLOHY	95
PŘÍLOHA A: MĚŘENÍ 1 – BRNO – KRÁLOVO POLE	96
PŘÍLOHA B: MĚŘENÍ 2 – HRUŠOVANY NAD JEVIŠOVKOU – PRAVICE.....	98
PŘÍLOHA C: MĚŘENÍ 3 – HUSTOPEČE NAD BEČVOU – VYSOKÁ.....	99
PŘÍLOHA D: VYBAVENÍ PRO MĚŘENÍ REZISTIVITY	100

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Závislost činitele K na roční době a množství srážek	17
Obrázek 2: Uspořádání elektrod pro měření rezistivity půdy – Wennerova metoda	18
Obrázek 3: Proměřování různých typů půd od povrchu až do velkých hloubek.....	20
Obrázek 4: Závislost rezistivity půdy na p pro rozličné poměry ρ_2/ρ_1	21
Obrázek 5: Křivky $k > 0$	22
Obrázek 6: Křivky $k < 0$	23
Obrázek 7: Graf křivek rozestupů pro $k > 0$	24
Obrázek 8: Uspořádání elektrod pro měření rezistivity půdy – Schlumbergerova metoda	25
Obrázek 9: Konstrukce a zapojení Owensovy dvoupólové zemní elektrody.....	26
Obrázek 10: Určení zemního odporu tyče	27
Obrázek 11: Měření rezistivity různých typů půd dlouhou tyčí.....	28
Obrázek 12: Průměrné roční teploty půdy v ČR v hloubce 50 cm	30
Obrázek 13: Křivky pro určení měrné vodivosti a relativní permitivity půdy na základě známého obsahu vody v půdě.....	31
Obrázek 14: Křivky pro určení měrné vodivosti půdy ve frekvenčním rozsahu 100 Hz až 1 MHz na základě známé měrné vodivosti půdy při 100 Hz.....	34
Obrázek 15: Křivky pro určení měrné vodivosti půdy ve frekvenčním rozsahu 100 Hz až 1 MHz na základě známého obsahu vody v půdě.....	35
Obrázek 16: Křivky pro určení měrné vodivosti půdy v rozsahu obsahu vody v půdě 0,3–100 % v závislosti na frekvenci proudu	36
Obrázek 17: Křivky pro určení relativní permitivity půdy ve frekvenčním rozsahu 100 Hz až 1 MHz na základě známé měrné vodivosti půdy při 100 Hz	37
Obrázek 18: Křivky pro určení relativní permitivity půdy ve frekvenčním rozsahu 100 Hz až 1 MHz na základě známého obsahu vody v půdě.....	38
Obrázek 19: Schéma zapojení a rozmístění elektrod OMICRON CPC 100.....	40
Obrázek 20: Popis čelního panelu OMICRON CPC 100.....	41
Obrázek 21: Nastavení OMICRON CPC 100 na měření rezistivity půdy	42
Obrázek 22: Popis bočního panelu OMICRON CPC 100	43
Obrázek 23: Schéma zapojení a rozmístění elektrod PU 193.....	44
Obrázek 24: Popis čelního panelu PU 193.....	45
Obrázek 25: Nastavení PU 193 na měření rezistivity půdy	45
Obrázek 26: Elektrody s vytahovacím nástrojem PU 193	47
Obrázek 27: Porost na místě měření 2.....	48

Seznam obrázků

Obrázek 28: Uspořádání elektrod a měřicí stanoviště při měření 3	49
Obrázek 29: Potenciálový spád při probíhající měření	51
Obrázek 30: GUI těsně po spuštění	52
Obrázek 31: GUI po stisknutí tlačítka „Nastavit pocet mereni“	53
Obrázek 32: GUI po stisknutí tlačítka „Navrhnout volbu koeficientu k“	54
Obrázek 33: GUI po stisknutí tlačítka „Vykreslit krivky“	55
Obrázek 34: GUI po stisknutí tlačítka „Vypocitat Rho2“	56
Obrázek 35: Model – elektrody	57
Obrázek 36: Model – půda s elektrodami	58
Obrázek 37: Síť konečných prvků – půda	59
Obrázek 38: Síť konečných prvků – elektrody	60
Obrázek 39: Počet čtyřtětěňů v závislosti na iteračním kroku	61
Obrázek 40: Chyba ztrát v závislosti na iteračním kroku	61
Obrázek 41: Rozdíl ztrát v závislosti na iteračním kroku	62
Obrázek 42: Rozložení elektrického pole kolem proudových elektrod	62
Obrázek 43: Rozložení napětí mezi napět'ovými elektrodami	63
Obrázek 44: Měření 1 – poloha	64
Obrázek 45: Měření 1 – podmínky	65
Obrázek 46: Měření 1 – naměřené hodnoty	66
Obrázek 47: Měření 1 – OMICRON CPC 100 – GUI	67
Obrázek 48: Měření 1 – PU 193 – GUI	68
Obrázek 49: Měření 1 – výsledky simulací – OMICRON CPC 100 – průsečík 1	69
Obrázek 50: Měření 1 – výsledky simulací – OMICRON CPC 100 – průsečík 2	70
Obrázek 51: Měření 1 – výsledky simulací – OMICRON CPC 100 – průsečík 3	71
Obrázek 52: Měření 1 – výsledky simulací – PU 193	72
Obrázek 53: Měření 2 – poloha	73
Obrázek 54: Měření 2 – podmínky	73
Obrázek 55: Měření 2 – naměřené hodnoty	74
Obrázek 56: Měření 2 – OMICRON CPC 100 – GUI	75
Obrázek 57: Měření 2 – PU 193 – GUI	76
Obrázek 58: Měření 2 – výsledky simulací – OMICRON CPC 100 – průsečík 1	77
Obrázek 59: Měření 2 – výsledky simulací – OMICRON CPC 100 – průsečík 2	78
Obrázek 60: Měření 2 – výsledky simulací – PU 193 – průsečík 1	79
Obrázek 61: Měření 2 – výsledky simulací – PU 193 – průsečík 2	80

Seznam obrázků

<i>Obrázek 62: Měření 2 – výsledky simulací – PU 193 – průsečík 3.....</i>	<i>81</i>
<i>Obrázek 63: Měření 3 – poloha</i>	<i>82</i>
<i>Obrázek 64: Měření 3 – podmínky.....</i>	<i>82</i>
<i>Obrázek 65: Měření 3 – naměřené hodnoty</i>	<i>83</i>
<i>Obrázek 66: Měření 3 – OMICRON CPC 100 – GUI.....</i>	<i>84</i>
<i>Obrázek 67: Měření 3 – PU 193 – GUI.....</i>	<i>85</i>
<i>Obrázek 68: Měření 3 – výsledky simulací – OMICRON CPC 100.....</i>	<i>86</i>
<i>Obrázek 69: Měření 3 – výsledky simulací – PU 193 – průsečík 1.....</i>	<i>87</i>
<i>Obrázek 70: Měření 3 – výsledky simulací – PU 193 – průsečík 2.....</i>	<i>88</i>
<i>Obrázek 71: Rozložení elektrického pole kolem kruhového zemniče.....</i>	<i>90</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tabulka 1: Rozsahy hodnot rezistivity pro dané typy půd.....</i>	<i>16</i>
<i>Tabulka 2: Hodnoty konfiguračního koeficientu v závislosti na poměru a/b.....</i>	<i>19</i>
<i>Tabulka 3: Hodnoty ρ_1/ρ pro křivky $k > 0$ v závislosti na h/a.....</i>	<i>23</i>
<i>Tabulka 4: Hodnoty ρ/ρ_1 pro křivky $k < 0$ v závislosti na h/a.....</i>	<i>24</i>
<i>Tabulka 5: Hodnoty přepočítávacího koeficientu v závislosti na velikostech u a i.....</i>	<i>26</i>
<i>Tabulka 6: Relativní nasycení půdy v průběhu roku pro Jihomoravský a Zlínský kraj.....</i>	<i>29</i>
<i>Tabulka 7: Měrná vodivost hornin vzniklých v různých geologických obdobích (pro f do 100 Hz).....</i>	<i>33</i>
<i>Tabulka 8: Hodnoty relativní permeability různých typů půd a hornin.....</i>	<i>39</i>
<i>Tabulka 9: Typické hodnoty na AC a DC výstupu OMICRON CPC 100.....</i>	<i>43</i>
<i>Tabulka 10: Hodnoty rozestupu elektrod a frekvence proudu PU 193</i>	<i>45</i>
<i>Tabulka 11: Pracovní podmínky PU 193</i>	<i>46</i>
<i>Tabulka 12: Příklad výsledků simulace.....</i>	<i>60</i>
<i>Tabulka 13: Měření 1 – naměřené hodnoty a vypočtené rezistivity</i>	<i>66</i>
<i>Tabulka 14: Měření 1 – OMICRON CPC 100 – GUI.....</i>	<i>67</i>
<i>Tabulka 15: Měření 1 – PU 193 – GUI.....</i>	<i>68</i>
<i>Tabulka 16: Měření 1 – výsledky simulací – OMICRON CPC 100 – průsečík 1.....</i>	<i>69</i>
<i>Tabulka 17: Měření 1 – výsledky simulací – OMICRON CPC 100 – průsečík 2.....</i>	<i>70</i>
<i>Tabulka 18: Měření 1 – výsledky simulací – OMICRON CPC 100 – průsečík 3.....</i>	<i>71</i>
<i>Tabulka 19: Měření 1 – výsledky simulací – PU 193.....</i>	<i>72</i>
<i>Tabulka 20: Měření 2 – naměřené hodnoty a vypočtené rezistivity</i>	<i>74</i>
<i>Tabulka 21: Měření 2 – OMICRON CPC 100 – GUI.....</i>	<i>75</i>
<i>Tabulka 22: Měření 2 – PU 193 – GUI.....</i>	<i>76</i>
<i>Tabulka 23: Měření 2 – výsledky simulací – OMICRON CPC 100 – průsečík 1.....</i>	<i>77</i>
<i>Tabulka 24: Měření 2 – výsledky simulací – OMICRON CPC 100 – průsečík 2.....</i>	<i>78</i>
<i>Tabulka 25: Měření 2 – výsledky simulací – PU 193 – průsečík 1.....</i>	<i>79</i>
<i>Tabulka 26: Měření 2 – výsledky simulací – PU 193 – průsečík 2.....</i>	<i>80</i>
<i>Tabulka 27: Měření 2 – výsledky simulací – PU 193 – průsečík 3.....</i>	<i>81</i>
<i>Tabulka 28: Měření 3 – naměřené hodnoty a vypočtené rezistivity</i>	<i>83</i>
<i>Tabulka 29: Měření 3 – OMICRON CPC 100 – GUI.....</i>	<i>84</i>
<i>Tabulka 30: Měření 3 – PU 193 – GUI.....</i>	<i>85</i>
<i>Tabulka 31: Měření 3 – výsledky simulací – OMICRON CPC 100.....</i>	<i>86</i>

Seznam tabulek

<i>Tabulka 32: Měření 3 – výsledky simulací – PU 193 – průsečík 1</i>	<i>87</i>
<i>Tabulka 33: Měření 3 – výsledky simulací – PU 193 – průsečík 2</i>	<i>88</i>
<i>Tabulka 34: Měření 2 – výsledky simulace kruhového zemniče – PU 193 – průsečík 2</i>	<i>90</i>
<i>Tabulka 35: Měření 1 – kompletní naměřené hodnoty a vypočtené rezistivity</i>	<i>96</i>
<i>Tabulka 36: Měření 1 – měření frekvenční závislosti přístrojem OMICRON CPC 100</i>	<i>97</i>
<i>Tabulka 37: Měření 2 – kompletní naměřené hodnoty a vypočtené rezistivity</i>	<i>98</i>
<i>Tabulka 38: Měření 2 – měření frekvenční závislosti přístrojem OMICRON CPC 100</i>	<i>98</i>
<i>Tabulka 39: Měření 3 – kompletní naměřené hodnoty a vypočtené rezistivity</i>	<i>99</i>
<i>Tabulka 40: Měření 3 – měření frekvenční závislosti přístrojem OMICRON CPC 100</i>	<i>99</i>

SEZNAM ZKRATEK

Zkratka	Význam	Jednotka
AC	střídavý proud	
DC	stejnosměrný proud	
GUI	grafické uživatelské rozhraní v Matlabu	
N	napěťová elektroda	
<i>o</i>	osa měření	
P	proudová elektroda	
T	tyč	
ε_r	relativní permitivita	–
κ	hustota sněhu	g/cm ³
μ_r	relativní permeabilita	–
π	Ludolfovo číslo	–
ρ	elektrická rezistivita (půdy)	Ωm
$\rho_1, Rho1$	rezistivita povrchové vrstvy půdy	Ωm
$\rho_2, Rho2$	rezistivita spodní vrstvy půdy	Ωm
ρ_e	rezistivita elektrolytu	Ωm
ρ_{OM}	hodnota rezistivity půdy pro přístroj OMICRON CPC 100	Ωm
ρ_{PU}	hodnota rezistivity naměřená přístrojem PU 193	Ωm
ρ_{sim}	rezistivita ze simulace	Ωm
ρ_{sp}	správná hodnota rezistivity půdy pro přístroj PU 193	Ωm
σ	měrná elektrická vodivost	S/m
a	rozestup elektrod	m
a_{max}	největší rozestup elektrod	m
b	hloubka zaražení elektrod	m
\check{m}	číslo měření	–
D	průměr kruhu zemniče	m
d	průměr tyče	m
d_k	vlastní průměr zemniče	m
e	procentní chyba výpočtu	%

Seznam zkratek

h	tloušťka povrchové vrstvy půdy	m
h_k	hloubka uložení kruhového zemniče	m
I	proud tekoucí elektrodami	A
i	vzdálenost proudových elektrod od středu měření	m
K	koeficient roční doby	–
k	koeficient odrazu	–
L	délka paprskového zemniče	m
l	délky tyče v zemi	m
m	přepočítávací koeficient respektující rozložení elektrod	m
n	konfigurační koeficient	–
p	polovina vzdálenosti mezi proudovými elektrodami	m
R	odpor půdy / elektrod	Ω
R_e	odpor elektrolytu	Ω
R_K	odpor kruhového zemniče	Ω
R_P	odpor paprskového zemniče	Ω
r	poloměr okolní půdy pro simulaci v Ansysu	m
S	průřez vodiče	m ²
T	teplota půdy	°C
U	napětí mezi póly elektrod	V
u	polovina vzdálenosti mezi napěťovými elektrodami	m

1 ÚVOD

Elektrická rezistivita půdy (dále jen rezistivita půdy nebo pouze rezistivita) se měří za účelem správného návrhu uzemnění, které je důležité proto, aby byl uzemněný objekt udržován na potenciálu země; umožněna správná funkce elektrických strojů, přístrojů a zařízení; aby byly elektrické stroje, přístroje a zařízení chráněny pro účinky přepětí a velkých proudů; aby byly svedeny atmosférické proudy a omezeno přepětí a aby byli chráněni lidé a zvířata před úrazem při dotyku neživých částí, které mohou být v případě poruchy pod napětím, odpojením nebo snížením dotykového a krokového napětí na bezpečnou míru. [1]

Rezistivita půdy je jednou ze vstupních veličin pro výpočet odporu uzemnění dané zemnicí soustavy, který je prováděn při projektování elektrických stanic a vedení. Rezistivita je fyzikální veličina, která charakterizuje materiál z hlediska vedení elektrického proudu. Je převrácenou hodnotou měrné elektrické vodivosti.

Rezistivita půdy závisí na mnoha faktorech – například složení půdy, její hustota (tzv. zrnitost), teplota, vlhkost aj. Měří se nejčastěji pomocí 4 lineárně uspořádaných elektrod, které jsou se stejnými rozestupy a ve stejné hloubce zaraženy v měřené půdě, do níž pouštět proud, měří napětí a proud a z těchto hodnot je následně rezistivita půdy určena. Tato metoda se nazývá Wennerova a je popsána podrobněji v této práci.

Výpočet v rámci této metody, kterým se určuje rezistivita půdy, se zpravidla provádí pomocí dvou modelů – jednovrstvého a dvouvrstvého. V této práci je vyhodnoceno, který z těchto modelů je vhodnější pro zpracování naměřených dat.

2 REZISTIVITA PŮDY

Jelikož je tato práce zaměřená na měření rezistivity půdy, jsou v této kapitole uvedeny základní informace o tom, co je to rezistivita, jaká je její jednotka, proč se vůbec měří, v jakých řádech se pohybují její hodnoty pro různé typy půd, které se běžně vyskytují na území České republiky a jak ji ovlivňuje například roční doba.

Rezistivita (nebo též měrný odpor) je fyzikální veličina, která charakterizuje materiál z hlediska vedení elektrického proudu. Značí se ρ a její jednotkou je ohm metr (Ωm). Základní rovnice pro výpočet rezistivity je následující:

$$\rho = \frac{RS}{l} \quad (\Omega\text{m}) \quad (1)$$

kde R je odpor (Ω), S je průřez vodiče (m^2) a l je délka vodiče (m).

Tato rovnice se dá zjednodušeně interpretovat z hlediska půdy takto: Rezistivita půdy se rovná odporu válce s průřezem 1 m^2 a délkou 1 m , který je celý naplněný půdou. [2]

Rezistivita je převrácenou hodnotou měrné elektrické vodivosti:

$$\rho = \frac{1}{\sigma} \quad (\Omega\text{m}) \quad (2)$$

kde σ je měrná elektrická vodivost (S/m).

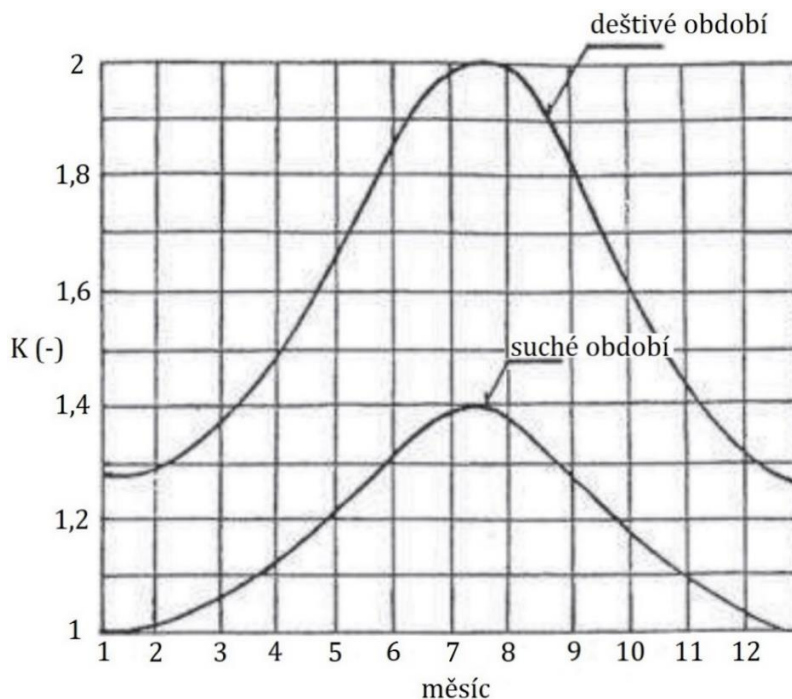
Rezistivita půdy se zpravidla měří pro hloubku, do které se budou ukládat zemniče, aby bylo možno co nejpresněji spočítat odpor uzemnění objektu v daném místě. Odpor uzemnění pracovního uzlu zdroje nemá překročit hodnotu 5Ω . Není-li možné dodržet tento limit ve ztížených půdních podmínkách, je dovoleno překročit jej, maximálně však o 10Ω . Ztíženými půdními podmínkami jsou myšlena místa, kde má půda v hloubce $1\text{--}3 \text{ m}$ rezistivitu větší jak $200 \Omega\text{m}$. Celkový odpor uzemnění PEN nebo PE vodičů opouštějících trafostanici, včetně uzemněného uzlu zdroje, nemá překročit hodnotu 2Ω , což platí pro TN sítě při nominálním napětí vůči zemi 230 V . [4]

Tabulka 1: Rozsahy hodnot rezistivity pro dané typy půd [3]

Typ půdy	Rozsah hodnot ρ (Ωm)
Močál	5–40
Hlína, jíl, humus	20–200
Písek	200–2 500
Zvětralá skála	do 1 000
Štěrkopísek	2 000–3 000
Pískovec	2 000–3 000
Moréna	do 30 000
Žula	do 50 000

2 Rezistivita půdy

Podle zdroje [4] se do výpočtu odporu velkých uzemňovacích soustav zahrnuje rezistivita půdy až do hloubky rovné úhlopříčce uzemňovací soustavy, maximálně však 20 m. Hodnota rezistivity už dále zůstává konstantní, což ovšem neplatí pro povrchovou vrstvu půdy do hloubky zhruba 3 m, jejíž rezistivita se mění podle ročního období a množství srážek. Toto ovlivnění je eliminováno vynásobením změřené rezistivity půdy koeficientem roční doby K , který také závisí na tom, zda v daném období prší, nebo je sucho. Tyto závislosti jsou znázorněny na obrázku 1.



Obrázek 1: Závislost činitele K na roční době a množství srážek [4]

Rezistivita půdy závisí kromě půdního typu a vlhkosti také na její hustotě (tzv. zrnitosti), teplotě, přítomnosti podzemních vod apod. Více v kapitole 4.1.

Podle zdroje [2] je vhodná poloha pro objekty s uzemněním v nadmořské výšce do 400 m n. m. Je to z toho důvodu, že v těchto výškách bývá tepleji a jelikož ve vyšších nadmořských výškách více prší, dochází k odplavování povrchových vrstev půdy, které se vyznačují nízkou rezistivitou, do nižších nadmořských výšek, čímž se tam vytvoří lepší podmínky pro uzemnění. Oblasti s vyšší nadmořskou výškou se tak stávají pro uzemnění méně příznivými.

3 METODY MĚŘENÍ REZISTIVITY PŮDY

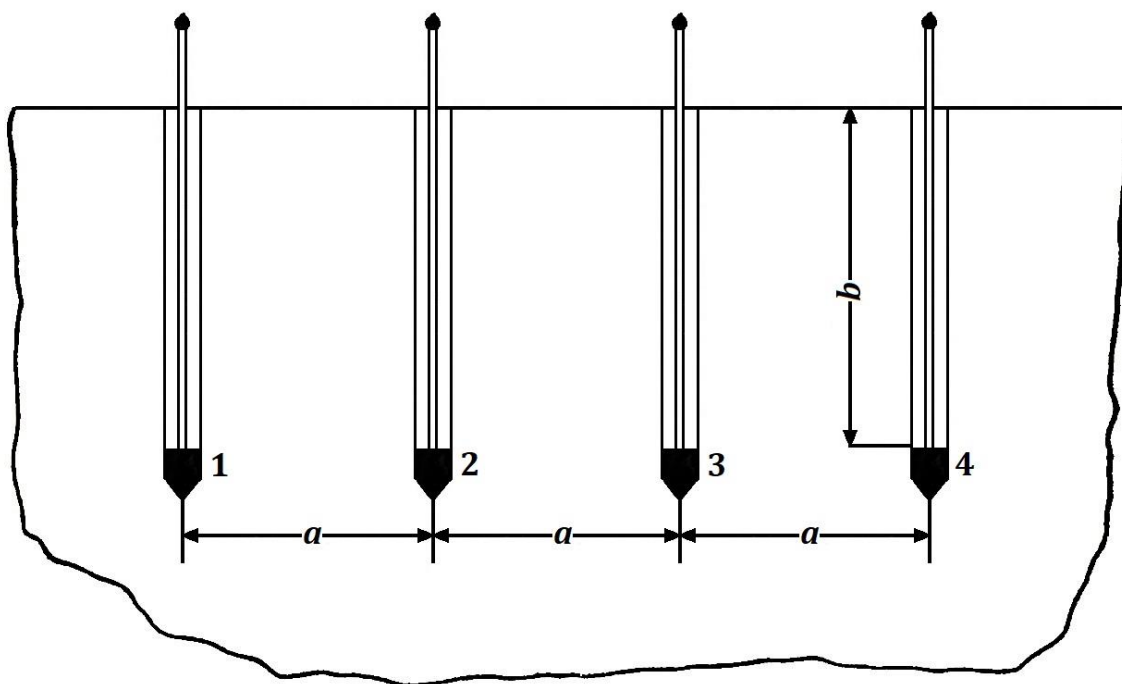
V této kapitole jsou popsány metody, které se používají k měření rezistivity půdy. Každá metoda má svá specifika – různou složitost a přesnost. Některá se používá hojně, jiná téměř vůbec.

3.1 Wennerova metoda

Jedná se o nejpoužívanější metodu ke změření rezistivity půdy. Je potřeba určit rezistivitu značného množství půdy (o šířce a délce v řádech desítek metrů a hloubce v řádech jednotek až desítek metrů). [5] Není vhodné daný objem půdy vyjmout z krajiny, zvláště proměřit v laboratorních podmínkách a zase vrátit zpět. Proto byla navržena tato metoda. Princip měření je popsán v následující kapitole 3.1.1.

3.1.1 Jednovrstvý model

Do země se vyhloubí čtyři otvory, které jsou umístěny v přímce a přibližně stejně daleko od sebe – rozestupy a . Jejich průměr nemá přesahovat deset procent vzdálenosti mezi nimi a všechny jsou vyhloubeny stejně hluboko – hloubka b . (Tato hloubka je limitována délkou použitých elektrod.) Do každého otvoru se umístí elektroda, která má elektrický kontakt se zemí pouze na dně otvoru, jak je znázorněno na obrázku 2. [5] V praxi se do půdy zatloukají nejčastěji železné tyče, které mají kontakt v celé délce b . Toto zjednodušení je však zdrojem jen malé chyby, kterou lze zanedbat. Elektrody 1 a 4 slouží jako proudové a elektrody 2 a 3 jako napěťové – stejně jako v [6].



Obrázek 2: Uspořádání elektrod pro měření rezistivity půdy – Wennerova metoda [5]

3 Metody měření rezistivity půdy

Takto vznikne čtyřpólový vodič, který se skládá ze dvou proudových a dvou napěťových elektrod. Odpor tohoto vodiče se spočítá jako napětí mezi napěťovými elektrodami lomeno proudem protékajícím mezi proudovými elektrodami, viz rovnice (3). [5]

Odpor tohoto čtyřpólového vodiče také závisí na vzdálenosti mezi elektrodami, ale nezávisí výrazně na jejich velikosti ani na druhu elektrického kontaktu se zemí. [5]

Rezistivita půdy v okolí čtyřpólového vodiče se dá spočítat podle následující rovnice, pokud je známa hloubka otvorů pro elektrody, vzdálenost mezi nimi a odpor vodiče [5]:

$$\rho = \frac{4\pi a \cdot \frac{U}{I}}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} - \frac{2a}{\sqrt{4a^2 + 4b^2}}} = \frac{4\pi a R}{n} \quad (\Omega\text{m}) \quad (3)$$

kde a je vzdálenost mezi otvory (m) (viz obrázek 2), U je napětí mezi napěťovými elektrodami (V), I je proud protékající mezi proudovými elektrodami (A), b je hloubka otvorů (m), R je odpor půdy (Ω) a n je konfigurační koeficient (-) [5].

Konfigurační koeficient nabývá hodnot od 1 do 2 a závisí na velikostech a a b , viz následující tabulka.

Tabulka 2: Hodnoty konfiguračního koeficientu v závislosti na poměru a/b [6]

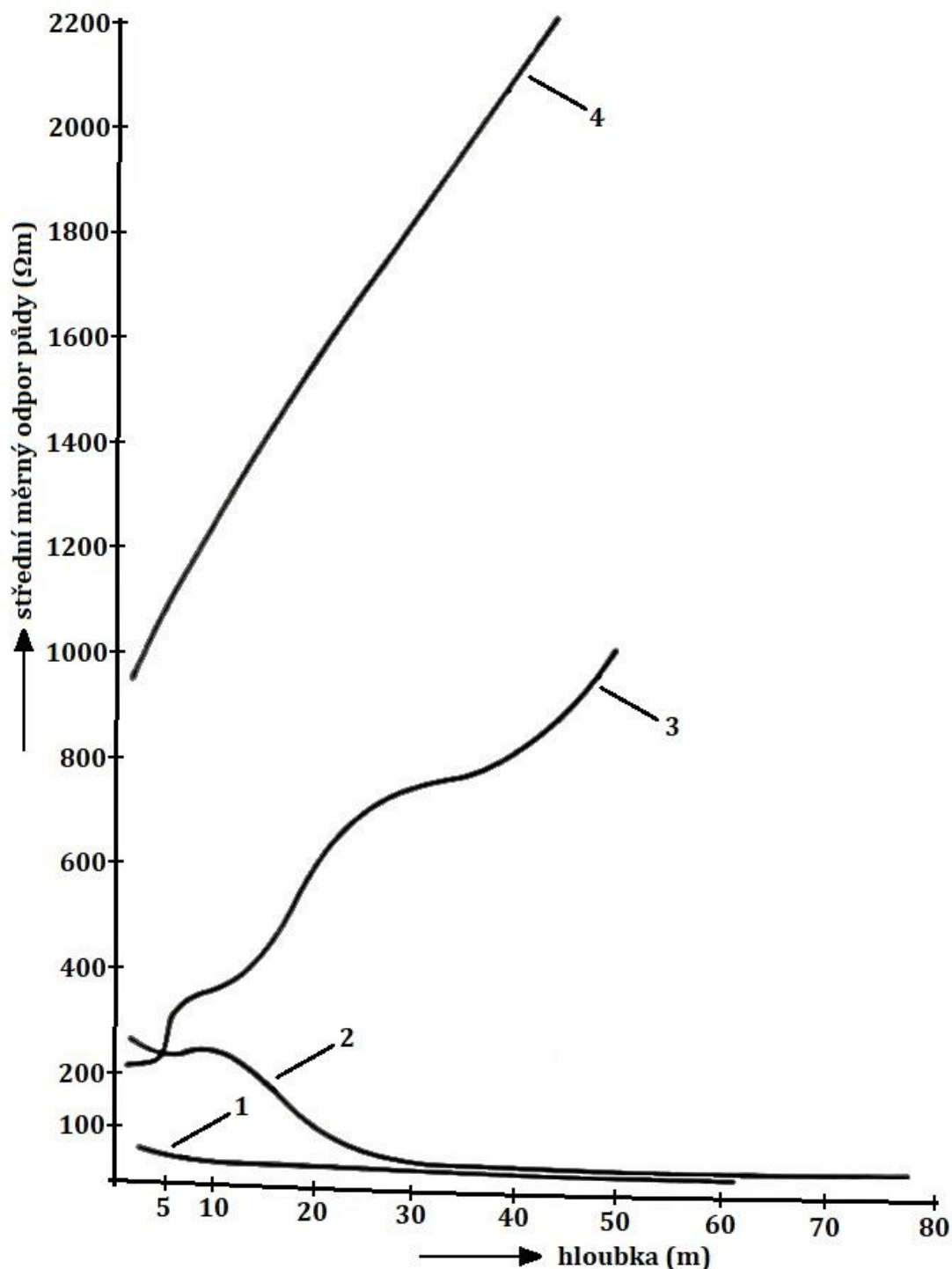
a/b	1/4	1/2	1	2	5	10	20	>20
n	1	1,038	1,187	1,520	1,876	1,966	1,991	2

Velikost a přibližně odpovídá hloubce, do které je rezistivita půdy měřena. [6]

Pokud nejsou otvory umístěny v přímce nebo nemají stejnou hloubku nebo se liší jejich vzdálenosti, je možné rovněž rezistivitu vypočítat, ale je nutné znát vzdálenosti otvorů a jejich hloubky. [5] Aby se však tímto výpočet nekomplikoval, bude při praktickém měření dbáno na to, aby elektrody byly v přímce a aby a a b byly všude stejné.

Na obrázku 3 jsou zaznamenána měření pro čtyři různé typy půd. U každé půdy byla měřena rezistivita v různých hloubkách podle toho, jak se měnily rozestupy elektrod a . U půdy označené číslem 1 je vidět, že její rezistivita se s hloubkou téměř nemění. Půda 2 se s rostoucí hloubkou stává lépe vodivou. Zdroj [6] uvádí, že se u ní ve větších hloubkách pravděpodobně vyskytují spodní vody, které rezistivitu snižují. Půda 3 naopak s rostoucí hloubkou ztrácí vodivost, protože se nachází na skalnatém podkladu, jehož rezistivita je mnohem vyšší než samotné půdy. U půdy 4 je povrchová vrstva relativně vodivá (jedná se o zvětralou skálu), avšak tenká, protože vodivost hlouběji prudce klesá. U ostatních půd je zřetelné, že mají tlustší povrchovou vrstvu (zhruba 5 m). Vypovídá o tom počáteční část křivky, která je přibližně rovnoběžná s vodorovnou osou, než nastane změna sklonu.

Z obrázku je vidět, že některé půdy jsou téměř homogenní (jejich vlastnosti se s rostoucí hloubkou nemění) a jiné jsou oproti tomu značně nehomogenní (jejich vlastnosti se s rostoucí hloubkou mění výrazně). Předpokladem měření rezistivity půdy Wennerovou metodou je uvažování homogenní půdy. Pokud tedy měřená půda není homogenní, dochází k chybě měření, která svou velikostí závisí na míře nehomogenity. Více na toto téma v kapitole 3.1.2.



Obrázek 3: Proměňování různých typů půd od povrchu až do velkých hloubek [6]

Zdroj [6] dále vyvozuje, jak se postupuje s uzemněním objektů nacházejících se na takovýchto půdách. Z obrázku 3 vyplývá, že u půdy 4 je vhodné použít pouze povrchové zemniče sestávající z drátů nebo pásů. Totéž platí pro půdu 3, kde by hloubkové zemniče nebyly hospodárné ani účelné. [6]

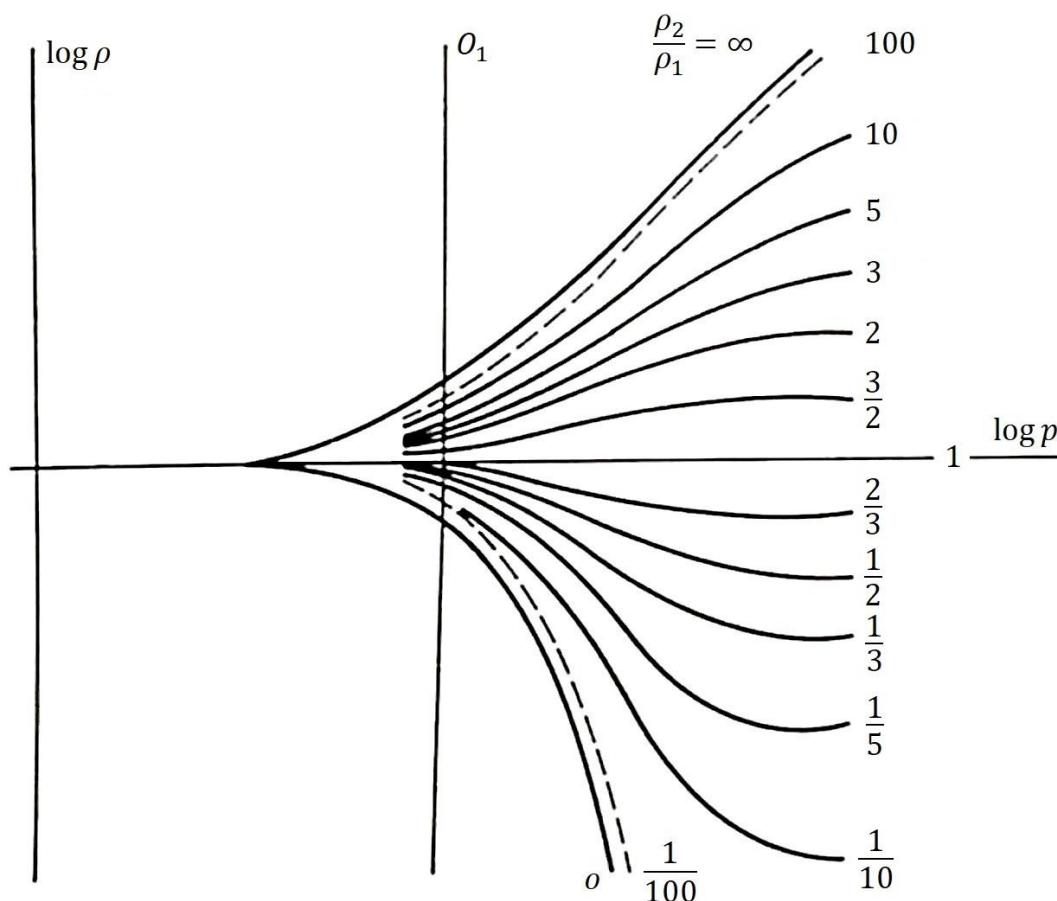
3.1.2 Dvouvrstvý model

Předpokladem je, že pomocí tohoto modelu by mělo být dosaženo přesnějších výsledků než s použitím jednovrstvého. Základní koncepce je taková, že se měřená půda nepokládá za jednu homogenní masu jako v předchozí kapitole 3.1.1 o jednovrstvém modelu, nýbrž je

pomyslně rozdělena na dvě vrstvy – povrchovou a spodní. Rezistivita povrchové vrstvy se značí ρ_1 a rezistivita spodní vrstvy ρ_2 . Tloušťka povrchové vrstvy budiž označena jako h . [6] Tloušťka spodní vrstvy je teoreticky nekonečná. [7]

3.1.2.1 Podle Osolobě

Zdroj [6] předkládá následující postup: Nejprve se změří rezistivita půdy pro různé rozestupy elektrod. Na základě těchto údajů je vykreslena křivka, která je závislostí rezistivity půdy na polovině vzdálenosti mezi proudovými elektrodami (3a). Tato vzdálenost budiž označena jako $p = 1,5a$. Graf bude mít následující tvar: $\log \rho = f(\log p)$. Tato křivka se porovnává s teoreticky určenými křivkami pro rozličné poměry ρ_2/ρ_1 a tloušťky povrchové vrstvy h . Křivky jsou znázorněny na obrázku 4.



Obrázek 4: Závislost rezistivity půdy na p pro rozličné poměry ρ_2/ρ_1 [6]

Dále se vezme křivka vytvořená z naměřených hodnot a srovnává se s jednotlivými teoretickými křivkami z obrázku 4. Křivka z naměřených hodnot musí být nakreslena ve stejném měřítku jako teoretické křivky. Prakticky to lze provést například tak, že se graf s křivkou naměřených hodnot nakreslí na průsvitku a posouvá se po grafu teoretických křivek do té doby, dokud není nalezena nejlepší možná shoda s jednou z teoretických křivek, a to v ideálním případě v celém průběhu, a souřadnicové osy obou grafů zůstanou rovnoběžné. [6]

Vzdálenost mezi osou $\log p$ referenčního grafu a toutéž osou na průsvitce pak udává hodnotu rezistivity povrchové vrstvy půdy ρ_1 . Vynásobením této hodnoty s poměrem ρ_2/ρ_1 odpovídající referenční křivky se získá rezistivita spodní vrstvy půdy ρ_2 . vzdálenost mezi čarou O_1 z referenčního grafu a osou $\log \rho$ na průsvitce pak udává tloušťku povrchové vrstvy půdy h . [6]

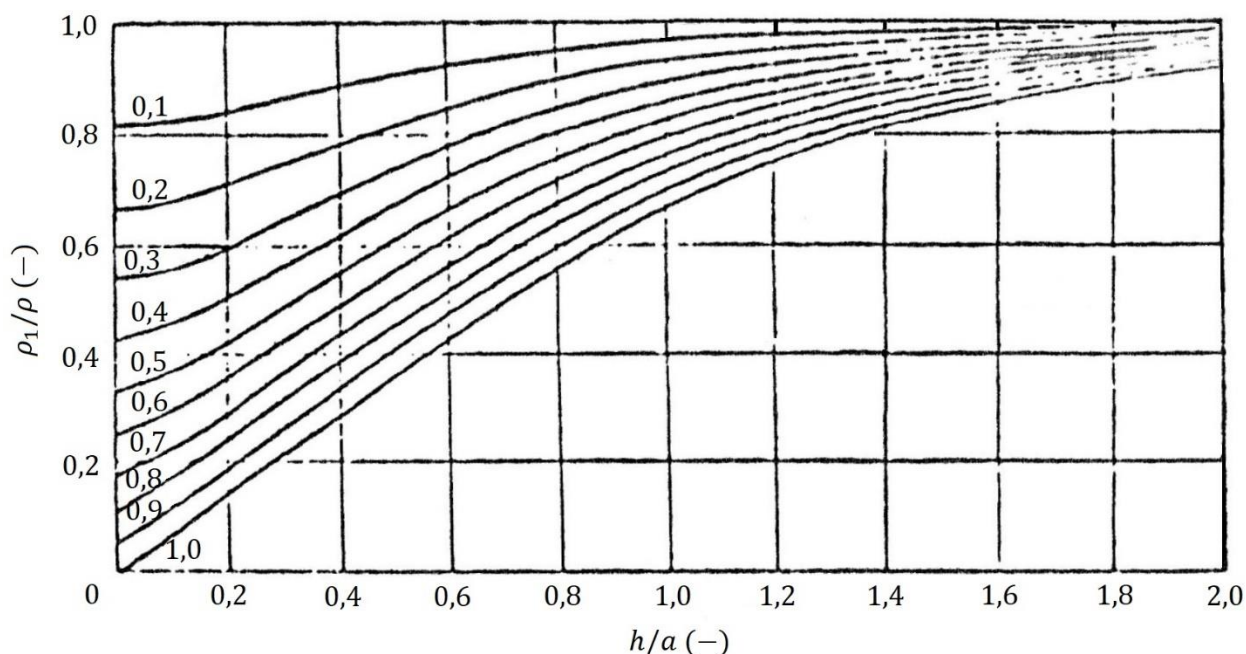
Pokud se křivka naměřených hodnot neshoduje s žádnou z referenčních křivek, neovlivní to postup pro zjišťování hodnot ρ_1 a h , ale ρ_2 se určí pomocí interpolace dvou sousedících referenčních křivek. [6]

3.1.2.2 Podle Tagga

Podle [7] je možné stanovit dvouvrstvý model (ρ_1 , h a ρ_2) následujícím způsobem: Nejprve se změří rezistivita půdy pro různé rozestupy elektrod. Poté se z rezistivit naměřených při malých rozestupech (do 1 m) stanoví ρ_1 jako jejich aritmetický průměr. Dále je třeba určit, zde je koeficient odrazu k kladný, nebo záporný. Pro jeho určení je v [7] uvedena následující rovnice:

$$k = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} \quad (-) \quad (4)$$

Pokud tedy naměřené rezistivity mají s rostoucím rozstupem rostoucí tendenci, znamená to, že $\rho_2 > \rho_1$ a tím pádem i $k > 0$. V opačném případě je $k < 0$. Dále se pro každý rozstup určí poměr rezistivity pro něj naměřené ρ a ρ_1 . Když $k > 0$, je tento poměr ρ_1/ρ . Když $k < 0$, poměr je ρ/ρ_1 . Na obrázku 5 jsou křivky pro k od 0,1 do 1, které jsou závislostí poměru ρ_1/ρ na poměru h/a .



Obrázek 5: Křivky $k > 0$ [7]

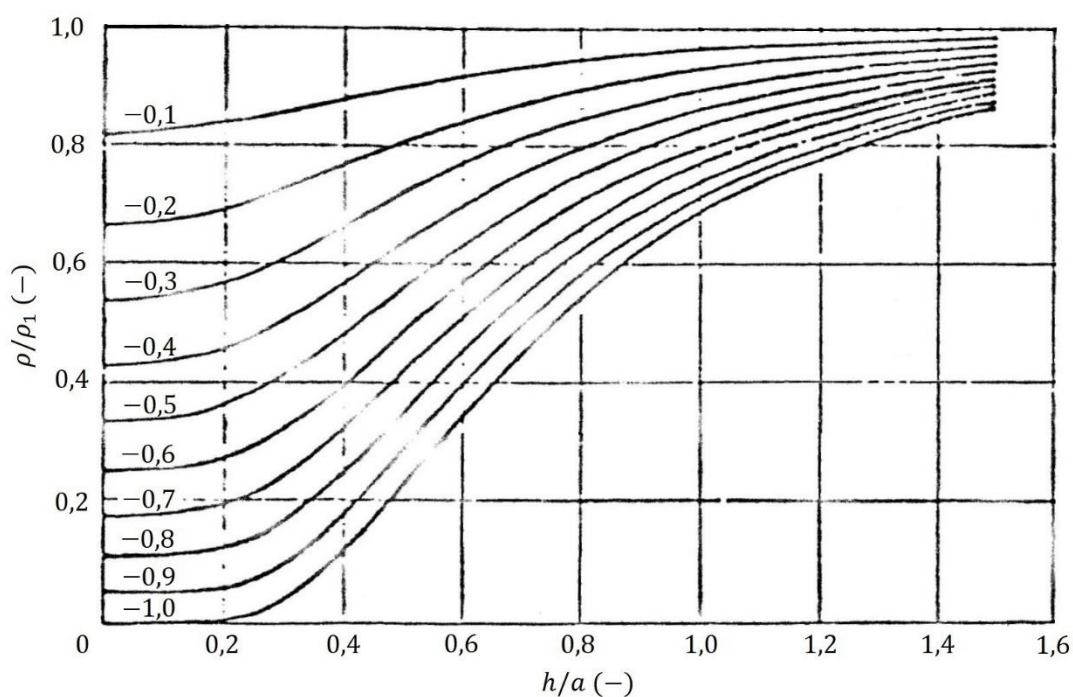
V následující tabulce jsou hodnoty ρ_1/ρ , ze kterých byly křivky v tomto obrázku sestaveny.

3 Metody měření rezistivity půdy

Tabulka 3: Hodnoty ρ_1/ρ pro křivky $k > 0$ v závislosti na h/a [7]

h/a	k									
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
0	0,8182	0,6667	0,5385	0,4286	0,3333	0,2500	0,1765	0,1111	0,0526	0,0000
0,1	0,8248	0,6798	0,5581	0,4549	0,3666	0,2907	0,2251	0,1682	0,1184	0,0722
0,2	0,8412	0,7097	0,5994	0,5057	0,4252	0,3555	0,2944	0,2403	0,1914	0,1443
0,3	0,8617	0,7458	0,6471	0,5621	0,4881	0,4228	0,3647	0,3123	0,2638	0,2164
0,4	0,8830	0,7825	0,6952	0,6185	0,5504	0,4894	0,4341	0,3832	0,3356	0,2884
0,5	0,9026	0,8168	0,7405	0,6719	0,6099	0,5533	0,5012	0,4524	0,4061	0,3597
0,6	0,9197	0,8472	0,7812	0,7207	0,6650	0,6131	0,5646	0,5185	0,4741	0,4293
0,7	0,9341	0,8723	0,8167	0,7639	0,7143	0,6675	0,6230	0,5802	0,5383	0,4957
0,8	0,9459	0,8950	0,8468	0,8011	0,7564	0,7158	0,6755	0,6362	0,5975	0,5576
0,9	0,9555	0,9132	0,8721	0,8327	0,7947	0,7578	0,7218	0,6864	0,6509	0,6141
1,0	0,9632	0,9275	0,8929	0,8592	0,8262	0,7939	0,7620	0,7302	0,6982	0,6647
1,1	0,9699	0,9394	0,9101	0,8812	0,8527	0,8245	0,7964	0,7682	0,7395	0,7093
1,2	0,9744	0,9491	0,9241	0,8994	0,8748	0,8503	0,8256	0,8007	0,7752	0,7482
1,3	0,9784	0,9570	0,9357	0,9145	0,8933	0,8718	0,8503	0,8287	0,8058	0,7818
1,4	0,9817	0,9635	0,9453	0,9270	0,9086	0,8900	0,8712	0,8519	0,8319	0,8106
1,5	0,9844	0,9688	0,9531	0,9374	0,9214	0,9052	0,8887	0,8718	0,8542	0,8353
1,6	0,9867	0,9732	0,9597	0,9460	0,9321	0,9180	0,9035	0,8886	0,8731	0,8561
1,7	0,9885	0,9769	0,9651	0,9532	0,9411	0,9287	0,9160	0,9029	0,8891	0,8743
1,8	0,9900	0,9799	0,9697	0,9593	0,9486	0,9378	0,9266	0,9150	0,9029	0,8897
1,9	0,9913	0,9825	0,9735	0,9644	0,9550	0,9455	0,9356	0,9254	0,9146	0,9029
2,0	0,9924	0,9846	0,9768	0,9687	0,9605	0,9520	0,9433	0,9342	0,9246	0,9142

Na obrázku 6 jsou křivky pro k od $-0,1$ do -1 , které jsou závislostí poměru ρ_1/ρ na poměru h/a .



Obrázek 6: Křivky $k < 0$ [7]

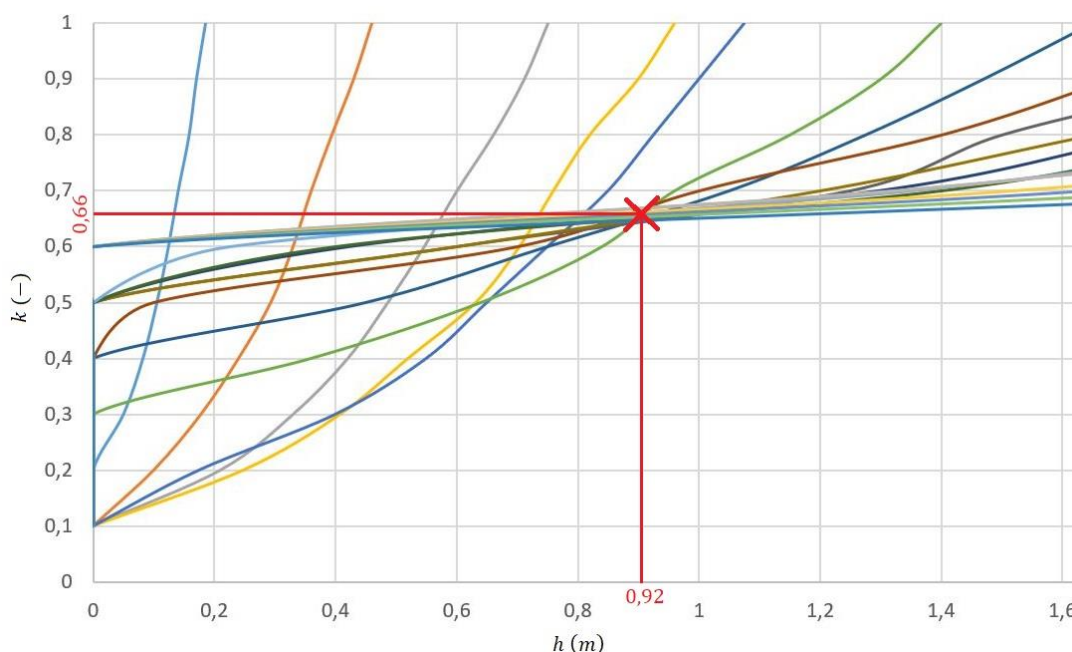
3 Metody měření rezistivity půdy

V následující tabulce jsou hodnoty ρ/ρ_1 , ze kterých byly křivky v tomto obrázku sestrojeny.

Tabulka 4: Hodnoty ρ/ρ_1 pro křivky $k < 0$ v závislosti na h/a [7]

h/a	k									
	-0,1	-0,2	-0,3	-0,4	-0,5	-0,6	-0,7	-0,8	-0,9	-1
0	0,8182	0,6667	0,5385	0,4286	0,3333	0,2500	0,1765	0,1111	0,0526	0,0000
0,1	0,8229	0,6733	0,5454	0,4350	0,3389	0,2544	0,1796	0,1131	0,0536	0,0000
0,2	0,8366	0,6941	0,5691	0,4587	0,3607	0,2733	0,1950	0,1246	0,0609	0,0033
0,3	0,8567	0,7277	0,6113	0,5058	0,4097	0,3221	0,2418	0,1682	0,1003	0,0378
0,4	0,8787	0,7672	0,6642	0,5690	0,4805	0,3982	0,3215	0,2497	0,1825	0,1194
0,5	0,8997	0,8059	0,7182	0,6358	0,5582	0,4850	0,4158	0,3502	0,2881	0,2290
0,6	0,9179	0,8404	0,7671	0,6976	0,6315	0,5686	0,5086	0,4512	0,3963	0,3438
0,7	0,9331	0,8695	0,8089	0,7510	0,6957	0,6426	0,5916	0,5426	0,4954	0,4499
0,8	0,9455	0,8933	0,8434	0,7955	0,7514	0,7049	0,6622	0,6208	0,5809	0,5422
0,9	0,9554	0,9121	0,8713	0,8317	0,7934	0,7564	0,7213	0,6859	0,6522	0,6196
1,0	0,9633	0,9279	0,8938	0,8609	0,8290	0,7981	0,7682	0,7391	0,7108	0,6833
1,1	0,9691	0,9403	0,9119	0,8845	0,8579	0,8320	0,8068	0,7824	0,7586	0,7352
1,2	0,9746	0,9501	0,9264	0,9034	0,8811	0,8593	0,8382	0,8176	0,7975	0,7779
1,3	0,9787	0,9581	0,9381	0,9187	0,8999	0,8815	0,8636	0,8465	0,8291	0,8125
1,4	0,9820	0,9646	0,9477	0,9312	0,9152	0,8996	0,8844	0,8695	0,8550	0,8408
1,5	0,9847	0,9698	0,9554	0,9414	0,9277	0,9144	0,9014	0,8886	0,8762	0,8640

Když je určeno, zda je k kladné, nebo záporné, vezme se odpovídající poměr hodnot ρ_1 a ρ pro jednotlivé rozestupy, pro každý rozestup a se hodnota tohoto poměru ze svislé osy vynese na všech 10 křivek, kde se z nich odečte poměr h/a . Každé křivce odpovídá hodnota koeficientu k podle tabulky. Následně se všech 10 hodnot h/a vynásobí jednotlivými rozestupy a . Takto je získáno 10 hodnot h pro každý rozestup. Poté je sestrojen graf $k = f(h)|_{\text{pro každé } a}$, ve kterém figurují křivky, jejichž počet je roven počtu rozestupů. Zde je příklad takového grafu pro $k > 0$.



Obrázek 7: Graf křivek rozestupů pro $k > 0$

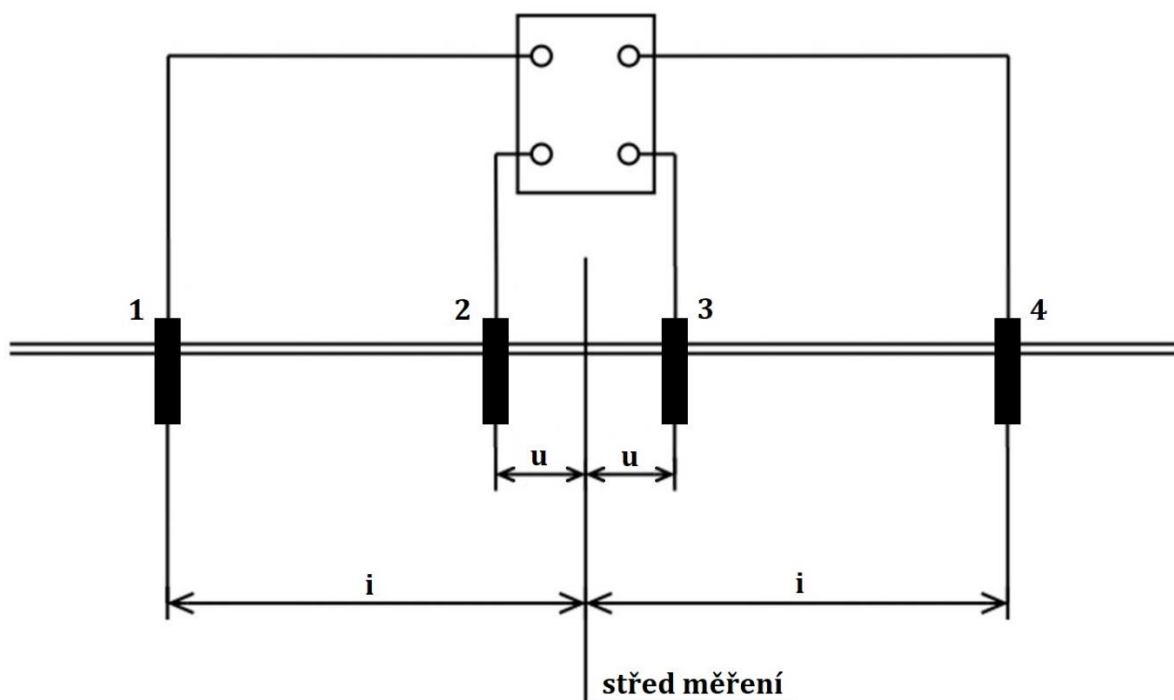
3 Metody měření rezistivity půdy

Z obrázku je vidět, že se křivky (v ideálním případě) protnou v jednom místě. Nalezený průsečík odpovídá hodnotám na svislé a vodorovné ose. Hodnota nalezená na vodorovné ose je hledaná tloušťka povrchové vrstvy h . Hodnota k nalezená na svislé ose se dosadí do rovnice (4), z níž je vyjádřena rezistivita spodní vrstvy následujícím způsobem:

$$\rho_2 = \rho_1 \cdot \frac{1 + k}{1 - k} \quad (\Omega\text{m}) \quad (5)$$

3.2 Schlumbergerova metoda

Jde o metodu, která je velmi podobná Wennerově metodě. Co se týče časové náročnosti, je na tom o něco lépe a přesností se vyrovná jejímu jednovrstvému modelu. Při měření je rovněž použito čtyřpólového elektrodového systému. Rozdíl je v tom, že jsou elektrody jinak prostorově uspořádány, viz obrázek 8.



Obrázek 8: Uspořádání elektrod pro měření rezistivity půdy – Schlumbergerova metoda [4]

Stejně jako u Wennerovy metody jsou elektrody umístěny v jedné přímce, ale nejsou od sebe stejně vzdáleny. Vnitřní elektrody, které se užívají pro měření napětí, jsou obě stejně daleko od pomyslného středu měření – ve vzdálenosti u a vnější elektrody, které pouštějí do půdy proud, jsou rovněž stejně daleko od pomyslného středu měření – ve vzdálenosti i .

Odpor půdy se spočítá, stejně jako u Wennerovy metody, tak, že se napětí změřené vnitřními elektrodami vydělí proudem změřeným vnějšími elektrodami. Tento odpor se dosadí do následující rovnice pro výpočet rezistivity půdy:

$$\rho = R \cdot m \quad (\Omega\text{m}) \quad (6)$$

kde m je přepočítávací koeficient respektující rozložení elektrod (m), který se vypočte následujícím způsobem:

3 Metody měření rezistivity půdy

$$m = \frac{\pi}{2} \cdot \left(\frac{i^2}{u} - u \right) \text{ (m)} \quad (7)$$

Podobně jako u Wennerovy metody vypočtená rezistivita půdy odpovídá rezistivitě do hloubky rovnající se polovině vzájemné vzdálenosti proudových elektrod i . Zdroj [4] rovněž nabízí následující tabulku s přepočítávacími koeficienty pro hloubku měření až 3 m, která má usnadnit výpočet rezistivity půdy.

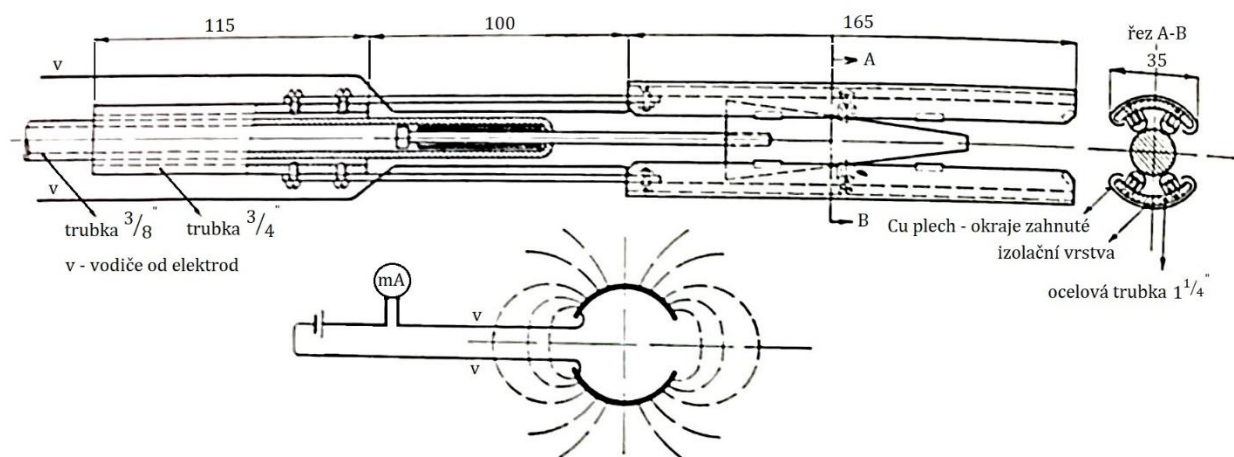
Tabulka 5: Hodnoty přepočítávacího koeficientu v závislosti na velikostech u a i [4]

i (m)	u (m)	m (m)
1	0,25	5,9
2	0,5	11,8
3	0,5	27,5

Schlumbergerova metoda je sice rychlejší z hlediska měření, ale oproti Wennerově metodě zůstává spíše v pozadí a není ani tak známá. Wennerova metoda je v praxi nejpoužívanější. [1]

3.3 Owensova metoda

Jedná se o přímou metodu měření rezistivity půdy, které probíhá v různých hloubkách mezi dvěma protilehlými místy na stěnách vyvrtané díry, jejíž hloubka se odvíjí od délky elektrod, které jsou k dispozici. Stěny díry musí být co nejhladší a celistvé. Do této díry je zasunuta dvoupólová zemní elektroda. Použije se trnu, aby se rozevřely její dotykové plochy, které tak jsou řádně přitlačeny ke stěnám díry. Tímto je zajištěn dobrý kontakt elektrody s půdou a tím i správnost měření. Trn je napojen na tyč, jejíž délku je možno upravit podle hloubky, do které je potřeba dosáhnout. Od dotykových ploch elektrody jsou vyvedeny kabely až do rukojeti prodlužovací tyče. Odpor půdy se dá změřit různými způsoby, ale nejvíce osvědčeným je použití pomocného napěťového článku 4,5 V a miliampérmetru, pomocí kterých se změří úbytek napětí. [6] Konstrukce a zapojení Owensovy dvoupólové zemní elektrody je na obrázku 9.



Obrázek 9: Konstrukce a zapojení Owensovy dvoupólové zemní elektrody [6]

3 Metody měření rezistivity půdy

Tímto způsobem se změří odpor úzké vrstvy půdy, která je v kontaktu s dotykovými plochami elektrody. Pro vypočtení rezistivity měřené půdy se musí nejprve určit poměr této rezistivity ku změřenému odporu. A jelikož je tento poměr stejný v jakémkoli elektrolytu, je možné ho jednoduše zjistit měřením v roztoku vody a sody. [6] Postup je následující:

Na válec, jehož průměr se shoduje s průměrem dvoupólové elektrody, se připevní zkušební elektrody válcového tvaru, které jsou rovněž shodného tvaru, a tento válec se ponoří do roztoku. Následně se změří rezistivita a odpor vzniklého elektrolytu, a tím je učen hledaný poměr ρ_e/R_e . [6]

Nakonec se vypočítá rezistivita půdy podle následující rovnice:

$$\rho = \frac{\rho_e}{R_e} \cdot \frac{U}{I} \quad (\Omega\text{m}) \quad (8)$$

kde ρ_e je rezistivita elektrolytu (Ωm), R_e je odpor elektrolytu (Ω), U je konstantní napětí 4,5 V a I je proud – jediná proměnná veličina při tomto měření (A).

3.4 Měření přímo tyčí

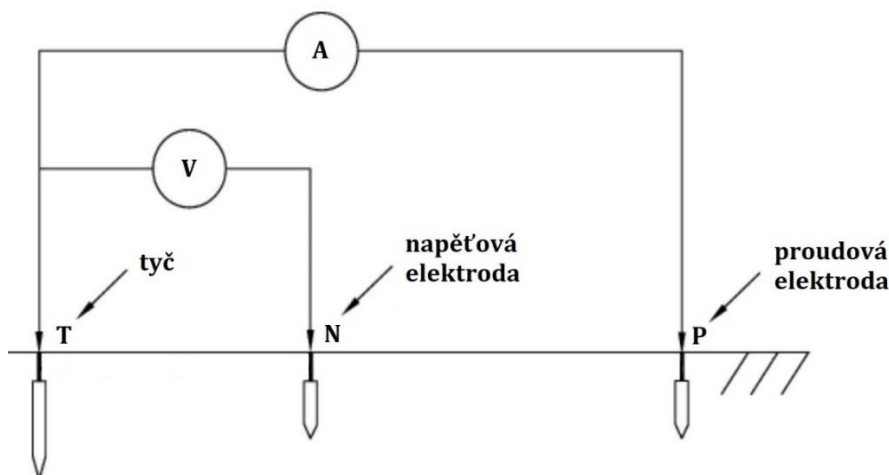
Tyč, která má délku l a průměr d , se zarazí kolmo do půdy, jejíž rezistivita se určí z následující rovnice:

$$\rho = \frac{2\pi l \cdot R}{\ln\left(\frac{4l}{d}\right)} \quad (\Omega\text{m}) \quad (9)$$

kde l je délka tyče v zemi (m) a d je průměr tyče (m).

Zemní odpor tyče R (Ω) se určí pomocí metody potenciálového spádu. Na obrázku 10 je znázorněn princip měření zemního odporu tyče T. Proudová elektroda P použít proud do země a napěťová N měří vzniklé napětí mezi sebou a tyčí. Obě elektrody jsou umístěny v přímce. Elektroda N se od tyče T umísťuje v 62 % vzdálenosti elektrody P od tyče – tzv. pravidlo 62 %. [8] Zemní odpor tyče se následně vypočítá z Ohmova zákona – viz následující rovnice:

$$R = \frac{U}{I} \quad (\Omega) \quad (10)$$



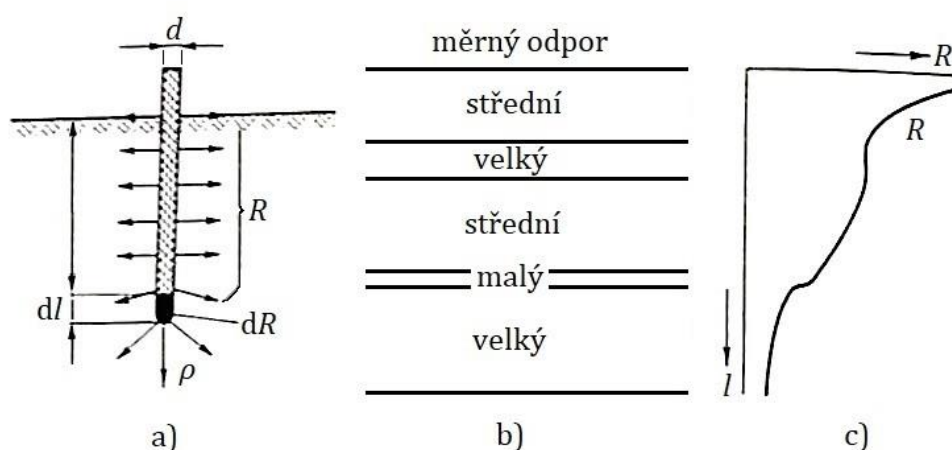
Obrázek 10: Určení zemního odporu tyče [8]

Například je-li tyč 1 m dlouhá a má průměr 2 cm, je možno vyčíslit rovnici (9) a výsledkem je, že $R \doteq 0,84\rho$. Když byla tato tyč zaražena do země, byl naměřen odpor $R = 150 \Omega$. Rezistivita měřené půdy tedy činila $\rho = 150/0,84 \doteq 178 \Omega\text{m}$.

Empiricky tedy bylo zjištěno, že pokud má tyč průměr 2 cm a zarazí se do hloubky 80 cm, bude její zemní odpor roven přímo rezistivitě půdy v daném místě. [6]

3.5 Měření dlouhou tyčí

Měření touto metodou probíhá tak, že je dlouhá tyč zarážena do země stále hlouběji a hlouběji. Pro každou délku zaražení tyče l o daném průměru d je změřen zemní odpor (stejně jako v kapitole 3.4) a stanoven gradient odporu dR/dl (v grafické podobě znázorněno na obrázku 11a).



Obrázek 11: Měření rezistivity různých typů půd dlouhou tyčí [6]

Rezistivita půdy se určí z Rüdenbergovy rovnice:

$$\rho = \frac{2\pi}{\ln\left(\frac{4l}{d}\right)} \cdot \frac{R^2}{-\frac{dR}{dl}} \quad (\Omega\text{m}) \quad (11)$$

Na obrázku 11b a c je znázorněno, že menší gradient odporu je naměřen v půdních vrstvách s vyšší rezistivitou, a naopak větší gradient odporu je naměřen v půdních vrstvách s nižší rezistivitou. Pokud se bude tyč zarážet postupně do různých hloubek, zjistí se tím, jakou mají rezistivitu jednotlivé vrstvy. Tudíž je tato metoda dobrá pro přesné určení vrstvy půdy, ve které se má nacházet zemnič. [6]

Vzhledem k tomu, že je k měření zapotřebí velice dlouhá a dostatečně pevná tyč, je tato metoda velmi nepraktická a v praxi se nepoužívá.

4 ELEKTROMAGNETICKÉ VLASTNOSTI PŮDY

V této kapitole je uvedeno, jak závisí elektrické a magnetické vlastnosti půdy – měrná elektrická vodivost, relativní permitivita a permeabilita – na frekvenci, teplotě a vlhkosti půdy a na dalších faktorech uvedených v kapitole 4.1. Rezistivitu půdy také do značné míry ovlivňuje sníh a led.

4.1 Faktory ovlivňující vlastnosti půdy

4.1.1 Povaha půdy

Elektrické vlastnosti půdy nezávisí primárně na chemickém složení půdy, ale na její schopnosti vázat vodu. Ukázalo se například, že vzorek půdy, který má normálně měrnou vodivost v řádech 10^{-2} S/m, když je vysušen, klesne jeho vodivost o 2 řády, čímž se dostane na úroveň žuly. [11]

4.1.2 Obsah vody v půdě

Jak již bylo zmíněno v předchozí kapitole 4.1.1, obsah vody v půdě je pravděpodobně hlavním faktorem určujícím její elektrické vlastnosti (měrnou vodivost a relativní permitivitu). Laboratorní měření ukázala, že jak se obsah vody zvyšuje od nízké hodnoty, měrná vodivost a relativní permitivita rapidně rostou, až dosáhnou svého maxima při hodnotách vlhkosti, které se běžně nacházejí v půdách v terénu. [11] V následující tabulce jsou průměrné hodnoty relativního nasycení půdy pro jednotlivé měsíce uplynulého roku v rámci Jihomoravského a Zlínského kraje (kde proběhla měření). Zvýrazněné hodnoty jsou z období, ve kterém byla prováděna měření v rámci této práce.

Tabulka 6: Relativní nasycení půdy v průběhu roku pro Jihomoravský a Zlínský kraj [12]

		Relativní nasycení půdy (%)					
	Měsíc	Duben 2018	Březen 2018	Únor 2018	Leden 2018	Prosinec 2017	Listopad 2017
Hloubka (cm)	0-40	53	69	81	90	84	82
	40-100	89	90	87	84	78	54
	Měsíc	Říjen 2017	Září 2017	Srpen 2017	Červenec 2017	Červen 2017	Květen 2017
Hloubka (cm)	0-40	80	58	41	35	31	56
	40-100	45	32	29	36	54	71

Poznámka: Relativní nasycení půdy je vyjádřeno na stupnici od 0 do 100 %.

0 % – půda neobsahuje žádnou vodu dostupnou pro rostliny

100 % – obsah vody v půdě dosáhl nejméně hodnoty polní kapacity v rozlišení 500 m [12]

Z tabulky 6 je vidět, že relativní nasycení půdy v Jihomoravském a Zlínském kraji se během jarních měsíců pohybuje v hloubce 0–40 cm okolo 60 %. V hloubce 40–100 cm pak okolo 85 %. V letních měsících jsou tyto hodnoty nejnižší v celém roce – v 0–40 cm zhruba 35 % a ve 40–100 cm pak asi 40 %. V podzimních měsících hodnoty pro 0–40 cm činí cca 75 % a pro 40–100 cm okolo 45 %. V zimních měsících je relativní nasycení půdy nejvyšší v celém roce – a to pro 0–40 cm 85 % a pro 40–100 cm 83 %.

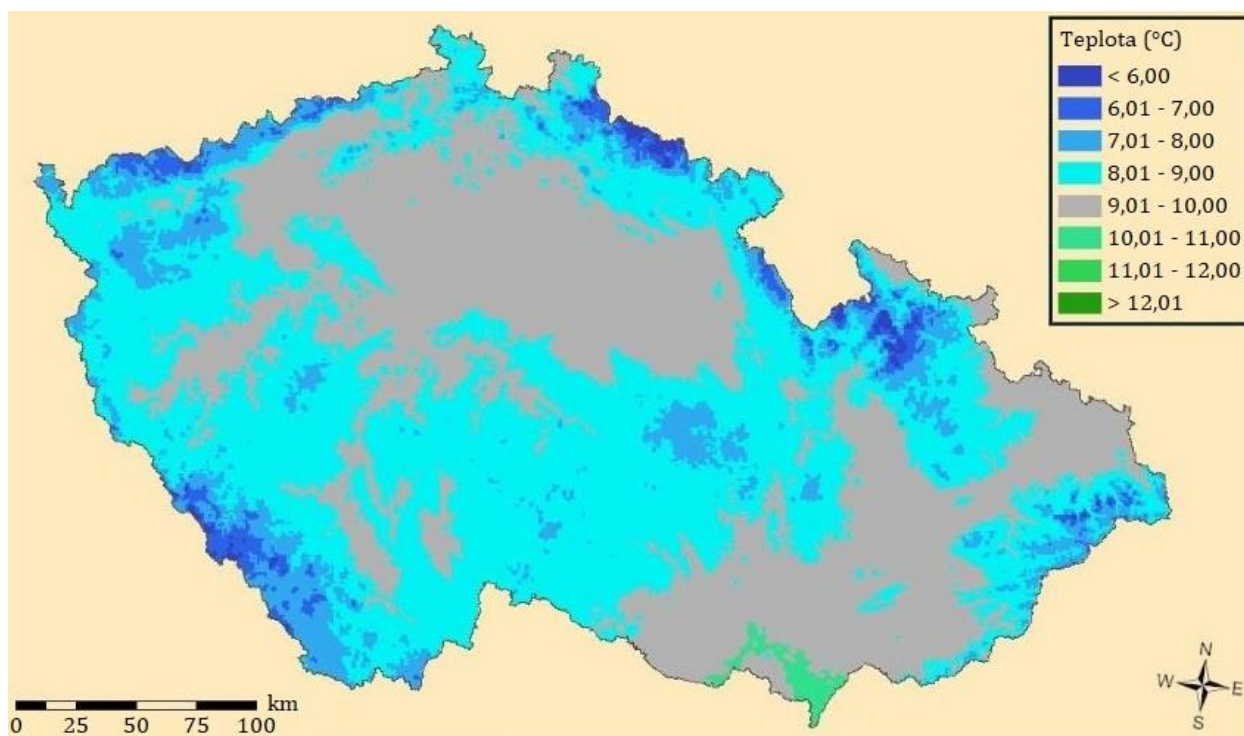
4 Elektromagnetické vlastnosti půdy

V hloubkách jednotek metrů zůstává vlhkost půdy konstantní po dobu celého roku, a i když by se mohlo zdát, že se po dešti musí zvýšit, odtokový systém v půdě a vypařování na povrchu způsobí, že se brzy vrátí na svou původní hodnotu. Obsah vody se ale může u jednoho druhu půdy lišit v závislosti na místě, kde je měřen, jelikož půdní odtokový systém závisí na geologické formaci daného místa. [11]

4.1.3 Teplota půdy

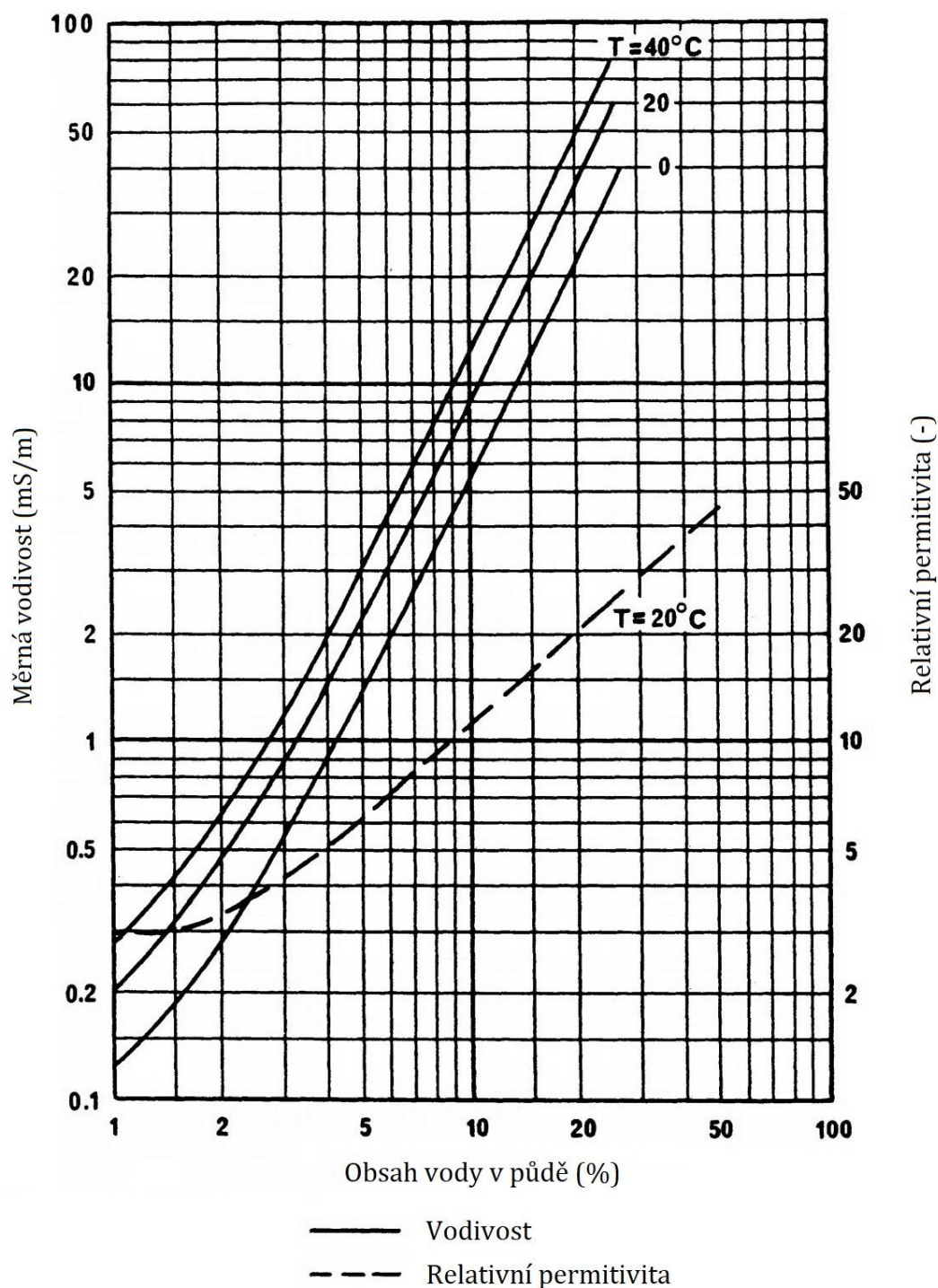
Laboratorní měření elektrických charakteristik půdy ukázala, že při nízkých frekvencích je teplotní koeficient vodivosti v řádech jednotek procent na stupeň Celsiův, zatímco u permitivity je zanedbatelný. Při bodě mrazu nastává obvykle velký pokles měrné vodivosti i relativní permitivity. Přestože jsou tyto změny znatelné, je nutno brát v potaz, že změna rozsahu teplot během roku rapidně klesá s hloubkou a vliv teploty (T) je významnější spíše při vysokých frekvencích, kdy proud nepronikne tak hluboko (viz kapitola 4.1.6), nebo když je půda zamrzlá do velké hloubky. [11]

Na následujícím obrázku je v mapě České republiky vyobrazeno rozložení průměrné roční teploty půdy v hloubce 50 cm.



Obrázek 12: Průměrné roční teploty půdy v ČR v hloubce 50 cm

Obrázek 13 znázorňuje závislost měrné vodivosti a relativní permitivity na obsahu vody v půdě a její teplotě. Je-li známo procentuální zastoupení vody v půdě, je možné z pravé svislé osy odečíst hodnotu relativní permitivity měřené půdy, avšak pod podmínkou, že má půda teplotu 20 °C. Stejně tak je možno z levé svislé osy odečíst hodnotu měrné vodivosti měřené půdy, pokud má půda teplotu v rozmezí 0–40 °C. [11]



Obrázek 13: Křivky pro určení měrné vodivosti a relativní permitivity půdy na základě známého obsahu vody v půdě [11]

4.1.4 Frekvence proudu

Laboratorní měření vzorků půdy ukázala, že existuje odchylka měrné vodivosti a relativní permitivity v závislosti na frekvenci, která výrazně závisí na obsahu vody v půdě. Hodnoty pro sladkou a slanou mořskou vodu mohou být stanoveny pro jakoukoli frekvenci. [11]

Zdroj [14] uvádí, že vlhké půdy se chovají jako vodič při frekvencích do 100 kHz. Naopak při vysokých frekvencích nad 100 MHz se chovají spíše jako izolant. Sám zdroj vyšetřuje elektrické vlastnosti různých typů půd při frekvencích od 1 kHz od 1 GHz, kdy se

tyto vyznačují jak měrnou vodivostí, tak rezistivitou, a vyčísluje jejich hodnoty. Pro tuto práci jsou však důležité frekvence do 400 Hz (viz kapitola 4). Lze tedy předpokládat, že pokud je půda, měřená v rámci této práce, vlhká, bude u ní převládat spíše vodivost.

4.1.5 Střídání ročních období

Působení střídání ročních období na proudové ztráty v půdě závisí na poměru hloubky, v níž se střídání ročních období projevuje, a hloubky, do které proniká proud. Hloubka, v níž se projevuje střídání ročních období, se pohybuje od 1 do 2 m (v závislosti na typu půdy). Působení ročních období je také závislé na frekvenci. Velmi malé sezónní změny, měřené při 100 kHz, jsou způsobeny výhradně změnami indexu lomu. Měření při středně vysokých frekvencích neprokázala téměř žádné změny v intenzitě elektrického pole během deštivého období ve srovnání s obdobím sucha. Tato měření s ohledem na teplotu ukázala změnu v intenzitě elektrického pole pouze 1–2 dB mezi zimou a létem. [11]

Měření vodivosti půl metru pod povrchem ukázala cyklickou sezónní změnu činitele vodivosti v této vrstvě. Hodnoty vodivosti jsou funkcí průměrné teploty půdy s malým kolísáním způsobeným naměřenými dešťovými srážkami. [11]

4.1.6 Geologická struktura

Půda obvykle není homogenní, proto jsou elektrické charakteristiky určeny několika různými typy půd. Z tohoto důvodu je velmi důležité znát geologickou strukturu místa, kde se nachází měřená půda. Elektrické charakteristiky jsou určeny nejen povahou povrchové vrstvy půdy, ale také podložními vrstvami. Tyto spodní vrstvy mohou tvořit část média, skrze které se přenáší proud nebo mohou mít nepřímý účinek na určení hladiny vody ve vyšších vrstvách. [11]

4.1.7 Sníh

Elektrické charakteristiky sněhu jsou dynamické. Mění se, jak sníh střídavě taje a mrzne. Je důležité rozlišit, zda se jedná o mokrý, nebo suchý sníh.

Relativní permitivita suchého sněhu je přímo úměrná jeho hustotě. Pro hustoty menší než 0,5 g/cm³ se určí podle následující rovnice:

$$\varepsilon_r = 1 + 1,9\kappa (-) \quad (12)$$

kde κ je hustota sněhu (g/cm³). Relativní permitivita suchého sněhu je závislá na teplotě a frekvenci v rozmezí 1–37 GHz. Odpovídající ztrátový limit permitivity suchého sněhu je zanedbatelný pro kmitočty pod 15 GHz. Typickou hodnotou komplexní relativní permitivity suchého sněhu je 1,6 – j10⁻³. [11]

Mokrý sníh je složitá směs vzduchu, ledu a vody. I malé množství vody může způsobit velkou změnu vlastností suchého sněhu. Mokrý sníh je disperzivní s největší změnou elektrických charakteristik vyskytujících se mezi 3 a 18 GHz. Typickou hodnotou komplexní relativní permitivity vlhkého sněhu při 10 GHz je 2 – j0,4. [11]

4.2 Měrná vodivost, relativní permitivita a permeabilita

Zdroj [15] zkoumá elektromagnetické vlastnosti jak různých typů půdy, tak i hornin, což při měření rezistivity půdy také nalezne své využití, jelikož se v běžných půdách vyskytuje

4 Elektromagnetické vlastnosti půdy

mnoho kamení, které má na výsledky měření také vliv. Zdroj hovoří o elektromagnetické vlně. Zde je vhodnější hovořit o proudu, který má také vlnový charakter a při měření je přes proudové elektrody pouštěn do půdy.

4.2.1 Měrná vodivost

Měrná vodivost se určuje měřením zdánlivé rezistivity při frekvencích do 20 Hz a interpretuje skutečnou rezistivitu vrstev v různých hloubkách metodou srovnávání s teoretickými křivkami. Interpretované hodnoty rezistivity jsou převedeny na odpovídající hodnoty měrné vodivosti, které jsou použitelné až od 100 Hz, protože měrná vodivost půdy a hornin je téměř konstantní při frekvencích do 100 Hz. [15]

V následující tabulce jsou hodnoty vodivosti s interpretovanými hodnotami rezistivity pro různá geologická období, ve kterých vznikaly různé typy hornin.

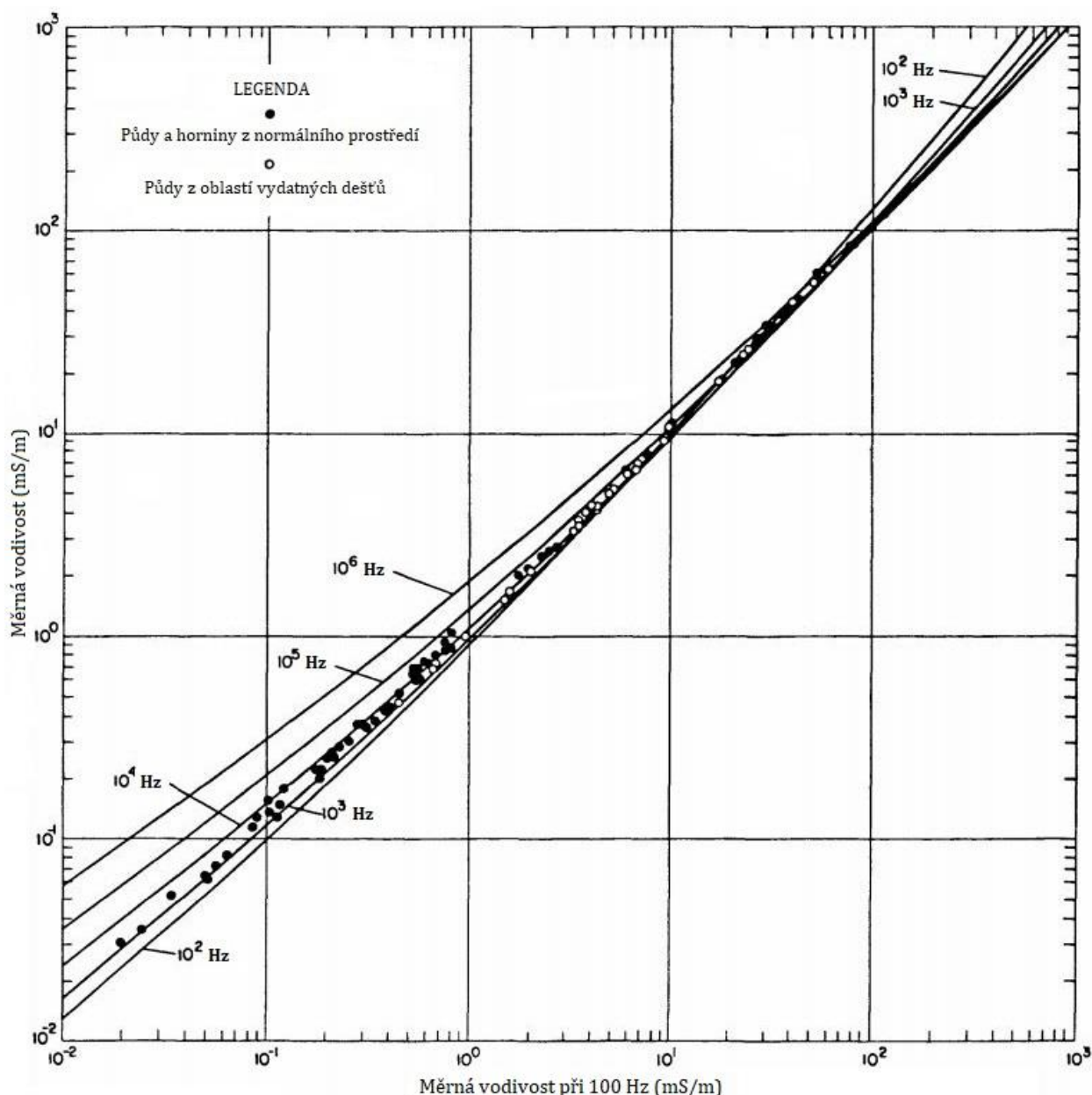
Tabulka 7: Měrná vodivost hornin vzniklých v různých geologických obdobích (pro f do 100 Hz) [15]

Měrná vodivost (mS/m)	Rezistivita (Ω m)	Geologická období a typy hornin				
		Čtvrtohory	Čtvrtohory Třetihory Křída	Jura, Trias Karbon	Devon Silur Ordovik Kambrium	Kambrium Prekambrium
3333	0,3					
(mořská voda)						
100	10	mělké solné pláně	hlína			
33	30		křída	křída, čedič		
(podzemní voda)						
10	100		naplavenina	alterovaný čedič, břidlice		
(sladká voda)						
3,3	300			vápenec, pískovec	břidlice, vápenec	
1	1000	hrubý písek a štěrky v povrchových vrstvách			pískovec, dolomit	pískovec
0,33	3000					kvarcit, břidlice, žula, rula
0,1	10000					

Měrná vodivost se tedy určuje pro frekvence v řádech 100 Hz až 1 MHz použitím statistických korelací tří parametrů získaných laboratorními měřeními vzorků půd a hornin – měrné vodivosti půdy při 100 Hz, frekvence proudu a měrné vodivosti, která může být určena také díky korelaci hodnot obsahu vody v půdě a frekvence rovněž v rozsahu 100 Hz až 1 MHz. Tato metoda je ale méně přesná, protože změna koncentrace iontů v přírodní vodě zavádí chybu. [15]

4 Elektromagnetické vlastnosti půdy

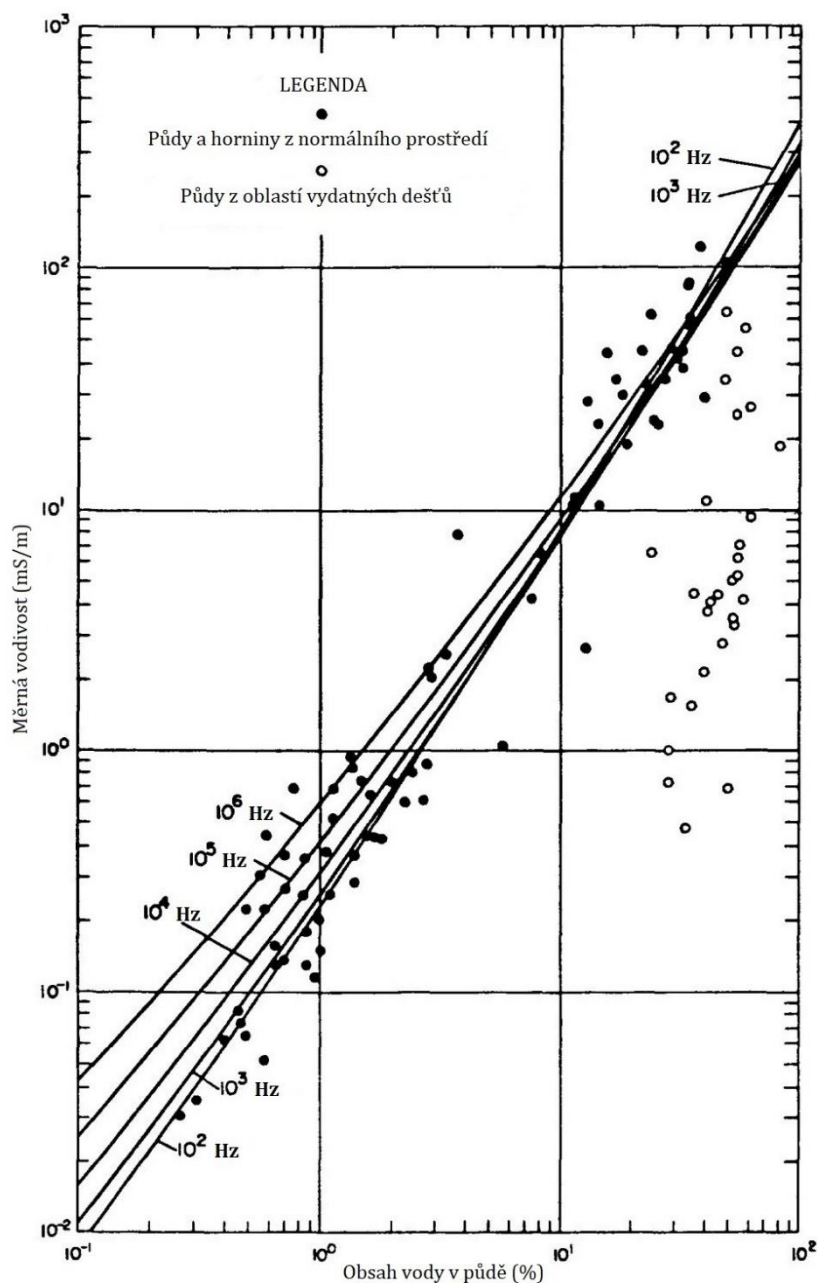
Pomocí následujícího obrázku se dá určit měrná vodivost měřené půdy, a to tak, že se známá hodnota měrné vodivosti půdy naměřená při 100 Hz z vodorovné osy vynese na křivku frekvence proudu, při které se půda měří (nebo na křivku vzniklou interpolací dvou okolních křivek), a bod nalezený na této křivce odpovídá hodnotě výsledné měrné vodivosti na svislé ose. Body vynesené na obrázku jsou příkladem měření půd při frekvenci 10^4 Hz.



Obrázek 14: Křivky pro určení měrné vodivosti půdy ve frekvenčním rozsahu 100 Hz až 1 MHz na základě známé měrné vodivosti půdy při 100 Hz [15]

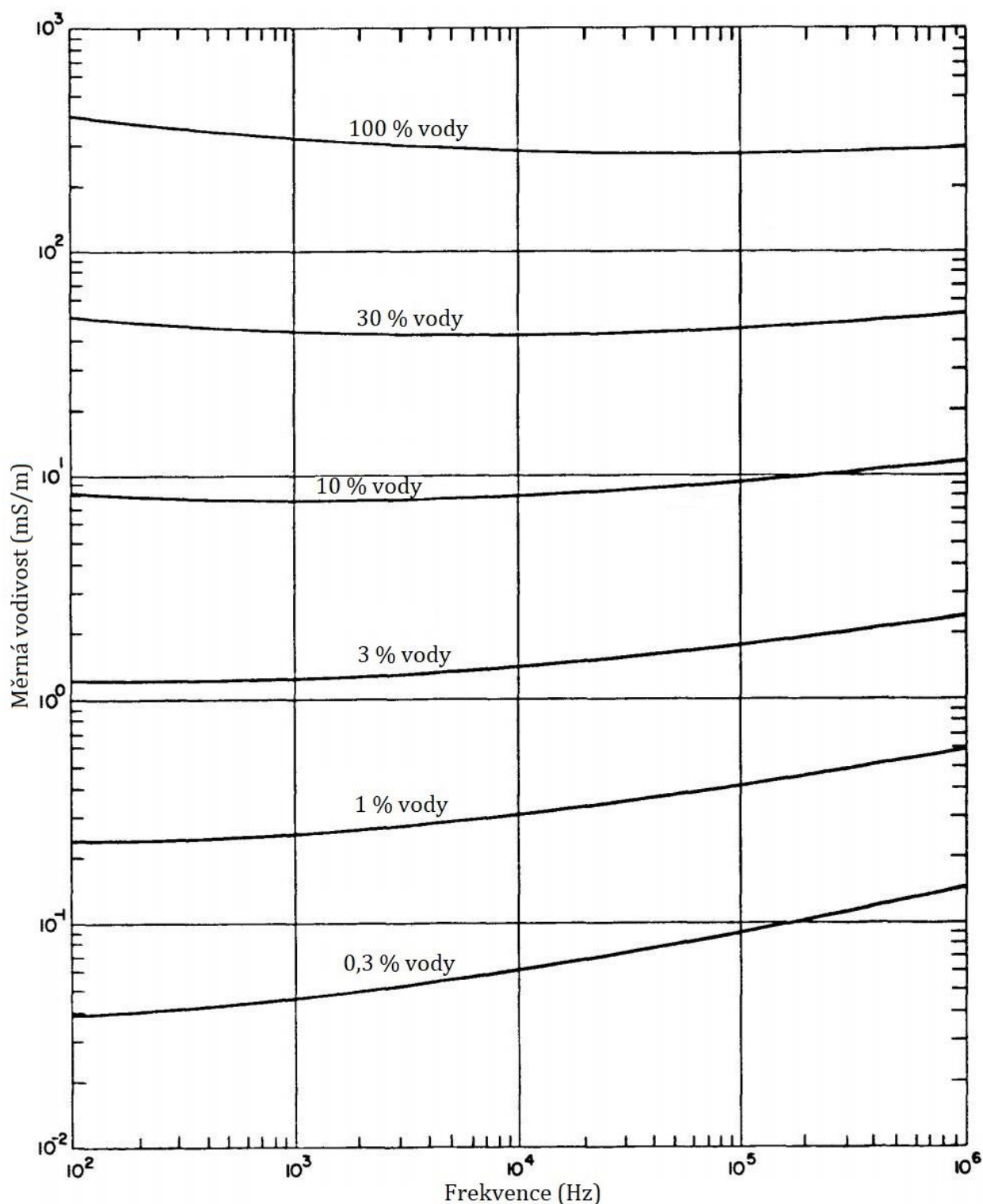
Z obrázku 15 se dá obdobně určit měrná vodivost měřené půdy, a to tak, že se známá hodnota obsahu vody v půdě z vodorovné osy vynese na křivku frekvence proudu, při které se půda měří (nebo na křivku vzniklou interpolací dvou okolních křivek), a bod nalezený na této křivce odpovídá hodnotě výsledné měrné vodivosti na svislé ose. Body vynesené na obrázku jsou příkladem měření půd při frekvenci 10^4 Hz.

4 Elektromagnetické vlastnosti půdy



Obrázek 15: Křivky pro určení měrné vodivosti půdy ve frekvenčním rozsahu 100 Hz až 1 MHz na základě známého obsahu vody v půdě [15]

Další způsob, jak stanovit hodnotu měrné vodivosti měřené půdy, je podle následujícího obrázku. Frekvence proudu, při které se půda měří, se z vodorovné osy vynese na křivku známé hodnoty obsahu vody v půdě v rozsahu 0,3–100 % (nebo na křivku vzniklou interpolací dvou okolních křivek) a bod nalezený na této křivce odpovídá hodnotě výsledné měrné vodivosti na svislé ose. Prostup je tedy stejný jako u předchozího obrázku, jen se hodnoty křivek vyměnily s hodnotami na vodorovné ose.



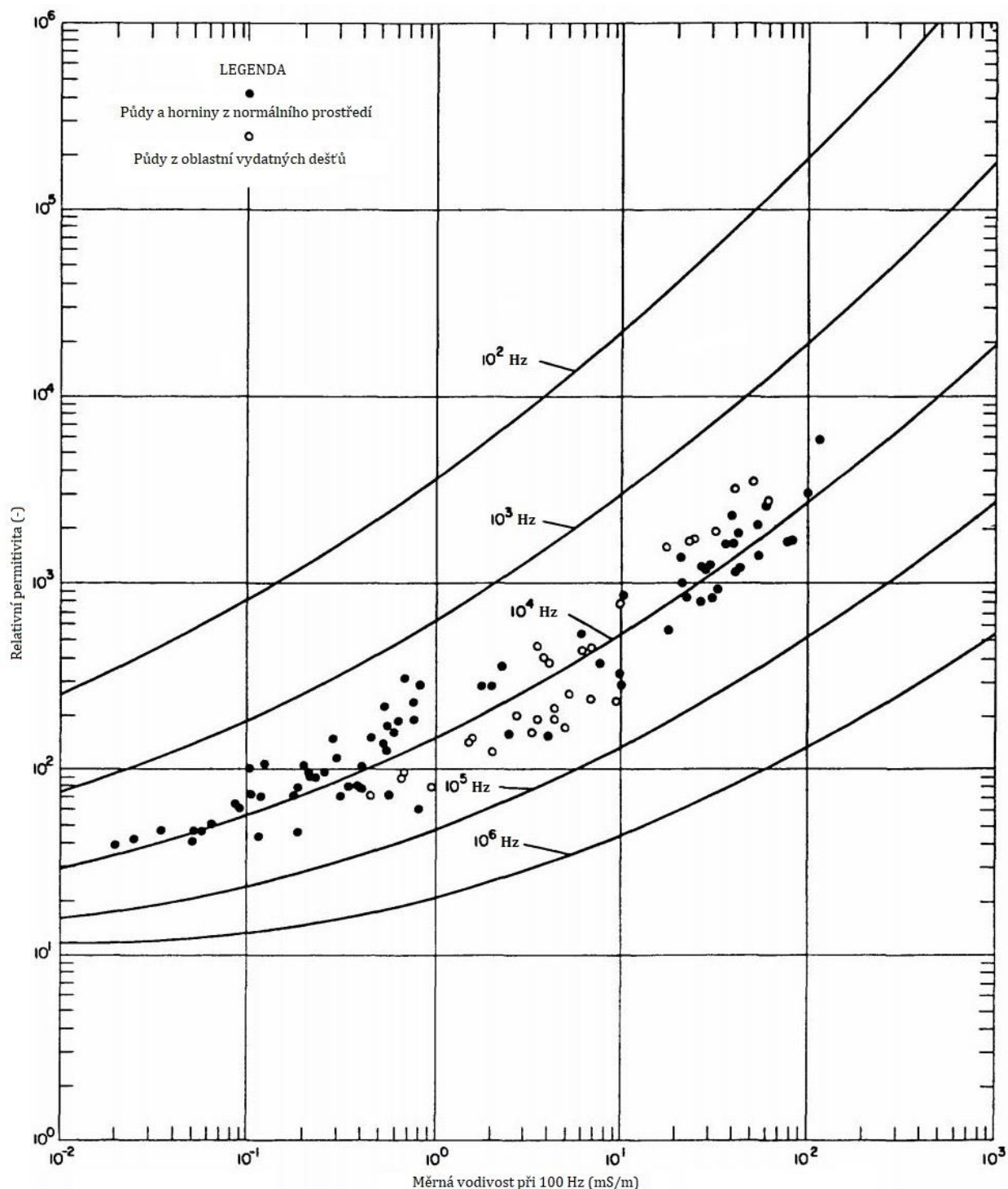
Obrázek 16: Křivky pro určení měrné vodivosti půdy v rozsahu obsahu vody v půdě 0,3–100 % v závislosti na frekvenci proudu [15]

4.2.2 Relativní permitivita

Relativní permitivita se určuje podobným způsobem jako měrná vodivost a její hodnoty jsou použitelné také v rozsahu 100 Hz až 1 MHz. Využívá se taktéž statistické korelace tří parametrů získaných z laboratorních měření vzorků půd a hornin – měrné vodivosti půdy při 100 Hz, frekvence proudu a měrné vodivosti. Rovněž je možné použít i druhou metodu,

4 Elektromagnetické vlastnosti půdy

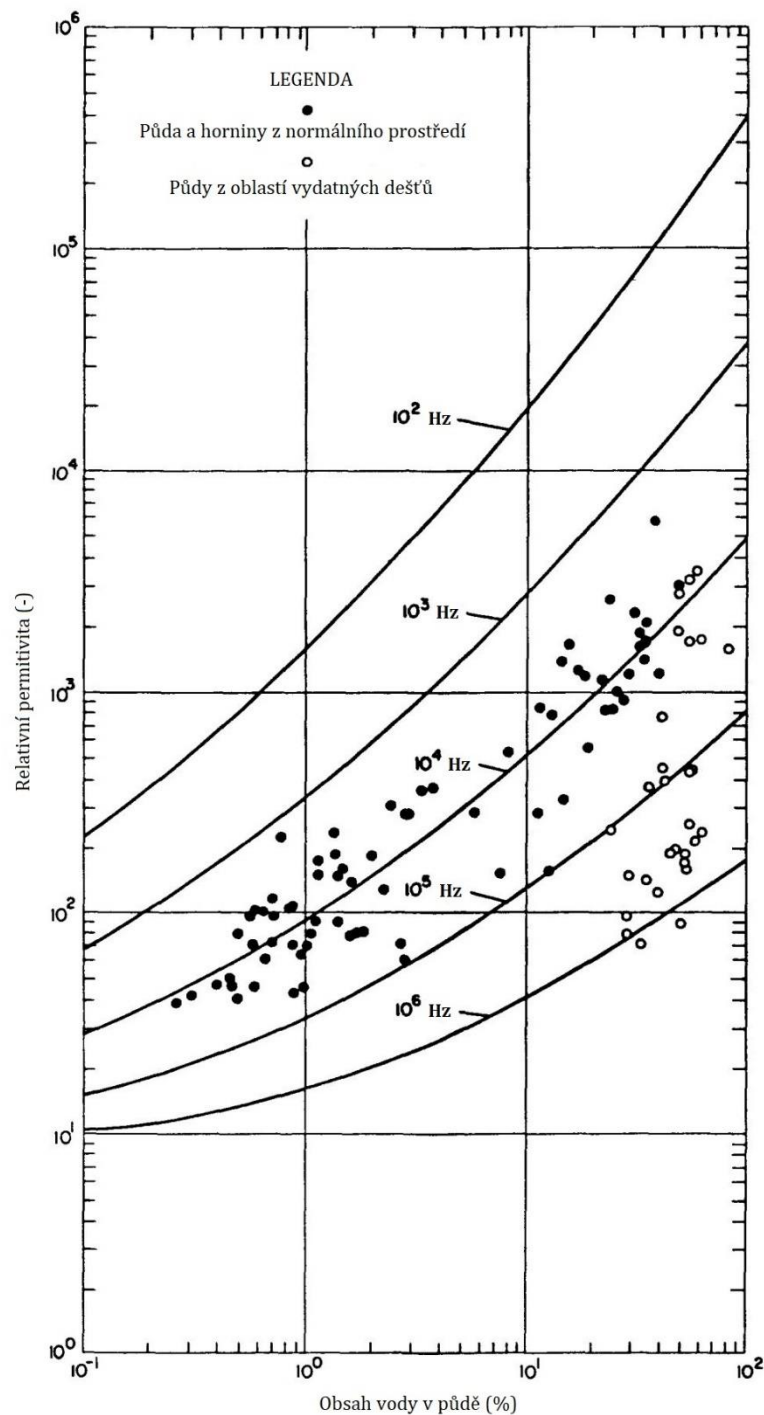
také v tomto frekvenčním rozsahu, kde se využívá korelace hodnot obsahu vody v půdě a frekvence. Je však méně přesná z důvodu změny koncentrace iontů ve vodě. [15]



Obrázek 17: Křivky pro určení relativní permitivity půdy ve frekvenčním rozsahu 100 Hz až 1 MHz na základě známé měrné vodivosti půdy při 100 Hz [15]

Pomocí obrázku 17 se dá určit relativní permitivita měřené půdy, a to tak, že se známá hodnota měrné vodivosti půdy naměřená při 100 Hz z vodorovné osy vynese na křivku frekvence proudu, při které se půda měří (nebo na křivku vzniklou interpolací dvou okolních křivek), a bod nalezený na této křivce odpovídá hodnotě výsledné relativní permitivity na svislé ose. Body vynesené na obrázku jsou příkladem měření půd při frekvenci 10^4 Hz.

4 Elektromagnetické vlastnosti půdy



Obrázek 18: Křivky pro určení relativní permitivity půdy ve frekvenčním rozsahu 100 Hz až 1 MHz na základě známého obsahu vody v půdě [15]

Z obrázku 18 se dá obdobně určit relativní permitivita měřené půdy, a to tak, že se známá hodnota obsahu vody v půdě z vodorovné osy vynese na křivku frekvence proudu, při které se půda měří (nebo na křivku vzniklou interpolací dvou okolních křivek), a bod nalezený na této křivce odpovídá hodnotě výsledné relativní permitivity na svislé ose. Body vynesené na obrázku jsou příkladem měření půd při frekvenci 10^4 Hz.

4.2.3 Relativní permeabilita

(Magnetická) relativní permeabilita je počítána z měření magnetické susceptibility při frekvenci 1 kHz. Její hodnoty jsou použitelné ve frekvenčním rozsahu 100 Hz až 1 MHz. Relativní permeabilita půdy nebo horniny není tak důležitá jako měrná vodivost a relativní permitivita, protože pro většinu materiálů vyskytujících se na Zemi je její hodnota jen nepatrně větší než 1. [15] V následující tabulce jsou uvedeny její hodnoty pro různé typy půd a hornin:

Tabulka 8: Hodnoty relativní permeability různých typů půd a hornin [15]

Typ půdy nebo horniny	Relativní permeabilita (-)	
	Typická hodnota	Rozsah hodnot
Půda všeobecně a usazené horniny	1,0006	1,00001–1,001
Naplavenina	1,004	1,0005–1,014
Pískovec s vysokým obsahem magnetitu	1,01	1,002–1,025
Sopečná hornina a půda	1,021	1,0001–1,053
Žula	1,076	1,017–1,136
Horniny v oblastech těžby železa	1,1	1,00001–14

Horniny v oblastech těžby železa jsou jediným materiálem, u kterého relativní permeabilita nabývá významnějších hodnot.

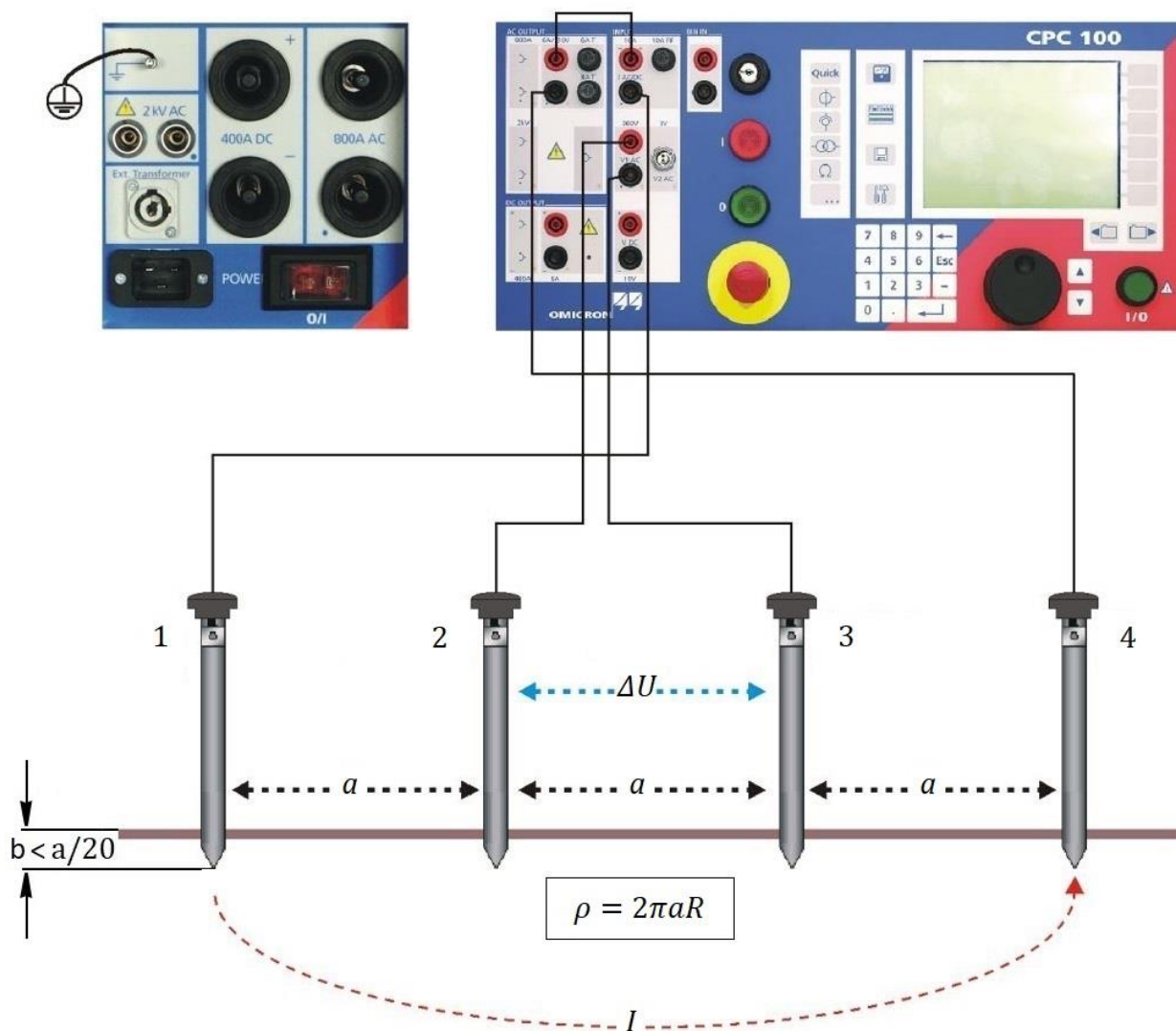
5 MĚŘICÍ PŘÍSTROJE

Tato kapitola je věnována přístrojům, které umožňují měřit rezistivitu půdy. Pro účely této práce byly použity dva měřicí přístroje – OMICRON CPC 100 a PU 193. Výhodou použití více než jednoho přístroje je možnost srovnání naměřených dat. Je zde ukázáno jejich propojení s měřicími elektrodami, ovládání a nastavení, princip výpočtu rezistivity z naměřených hodnot, parametry, a nakonec jsou vždy shrnuty jejich výhody a nevýhody.

5.1 OMICRON CPC 100

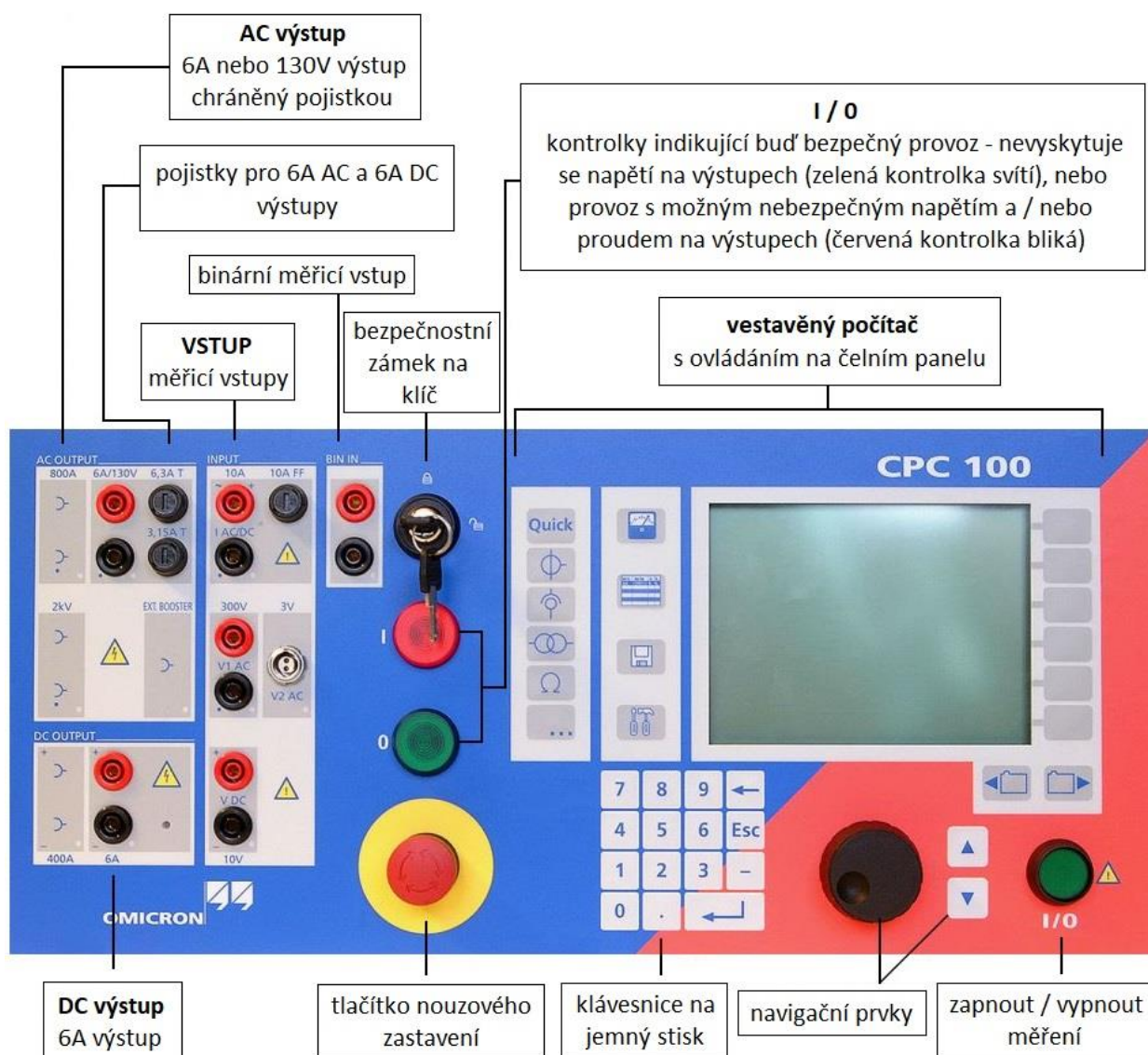
5.1.1 Schéma zapojení

Při měření rezistivity půdy tímto přístrojem je použita Wennerova metoda. Schéma jeho zapojení i s rozmístěním elektrod je znázorněno na následujícím obrázku.



Obrázek 19: Schéma zapojení a rozmístění elektrod OMICRON CPC 100 [9]

5.1.2 Ovládání a nastavení



Obrázek 20: Popis čelního panelu OMICRON CPC 100 [9]

Když je přístroj správně zapojen a zapnutý, je zapotřebí nastavit měření. Defaultně je nastavena karta „Quick“. Nejprve je zapotřebí vložit novou kartu – „Insert card“, na které se budou nastavovat parametry měření. Tímto se na displeji zobrazí všechny typy měření, které přístroj umožňuje. Vybere se typ „Resistance“ (odpor) a následně měření „RGround“ (zemní odpor). Rozložení zadávacích a měřících polí na této kartě odpovídá obrázku 21.

Vstupní parametry měření jsou dva – proud a jeho frekvence. Proud (na obrázku 21 označen jako „I test“) prochází vnějšími – proudovými elektrodami a v kapitole 9 je popsán vliv jeho velikosti na naměřené výsledky. Frekvence (na obrázku označena „f“), se podle [9] nemá nastavovat rovna síťové frekvenci 50 Hz a násobkům harmonických, protože by mohlo dojít k rušení bludnými zemními proudy majícími tyto frekvence. Z tohoto důvodu je jako výchozí hodnota nastaveno 128 Hz. V kapitole 9 je taktéž popsán vliv frekvence nastaveného proudu na naměřené výsledky. Přístroj má frekvenční rozsah 15–400 Hz.

R\Winding		TRTapCheck		R\Ground		Commer		Insert Card	
I test:		1.000 A						Delete Card	
f:		128.00 Hz						Rename Card	
I RMS:		879.0 mA						Clear Results	
V RMS:		474.5 mV		7.60 °				Save As Default	
R(f):		228.3 mΩ		X(f):		21.93 mΩ			
Assessed: n/a									

Obrázek 21: Nastavení OMICRON CPC 100 na měření rezistivity půdy [9]

Když jsou tyto vstupní parametry nastaveny, může být spuštěno měření – stisknutím zeleného tlačítka (viz obrázek 20). V průběhu měření je možné hodnotu I test měnit (zvyšovat i zmenšovat). Měření je interaktivní. V měřených polích se ihned zobrazují naměřené hodnoty. Po skončení měření naměřené hodnoty zůstanou na téže kartě. Proud, změřený proudovými elektrodami, je na obrázku 21 označen jako „I RMS“ (efektivní hodnota proudu) a napětí, změřené napěťovými elektrodami, je označeno jako „V RMS“ (efektivní hodnota napětí). Hodnota v políčku za napětím udává fázový posun mezi změřeným napětím a proudem. Přístroj rovnou vypočítá činný odpor půdy „R(f)“ a její reaktanci „X(f)“, která se sice pro výpočet rezistivity půdy nepoužije, ale má určitou vypovídající hodnotu, tudíž je při měření také zaznamenávána.

Zdroj [9] dodává, že se nedoporučuje používat více než patnáct karet nebo padesát výsledků v jedné testovací proceduře. Mohlo by tím dojít k zahlcení operační paměti zabudovaného počítače.

5.1.3 Princip výpočtu rezistivity

Přístroj změří proud prošlý půdou a proudovou elektrodou, změří také napětí mezi napěťovými elektrodami a z těchto hodnot vypočítá odpor. Ten se následně dosadí do rovnice (13) a vypočítá se rezistivita.

V [9] je naznačena zjednodušená rovnice pro výpočet rezistivity půdy:

$$\rho = 2\pi aR \text{ (}\Omega\text{m)} \quad (13)$$

která vychází z rovnice (3) a tabulky 2. Aby se rovnice (13) mohla použít, musí být dodržena podmínka uvedená rovněž v obrázku 19:

$$b < a/20 \text{ (m)} \quad (14)$$

Z tabulky 2 v kapitole 3.1.1 vyplývá, že když je poměr $a/b > 20$, konfigurační koeficient $n = 2$. Dosazením do rovnice (3) se tedy získá rovnice (13):

$$\rho = \frac{4\pi aR}{n} = \frac{4\pi aR}{2} = 2\pi aR \text{ (}\Omega\text{m)}$$

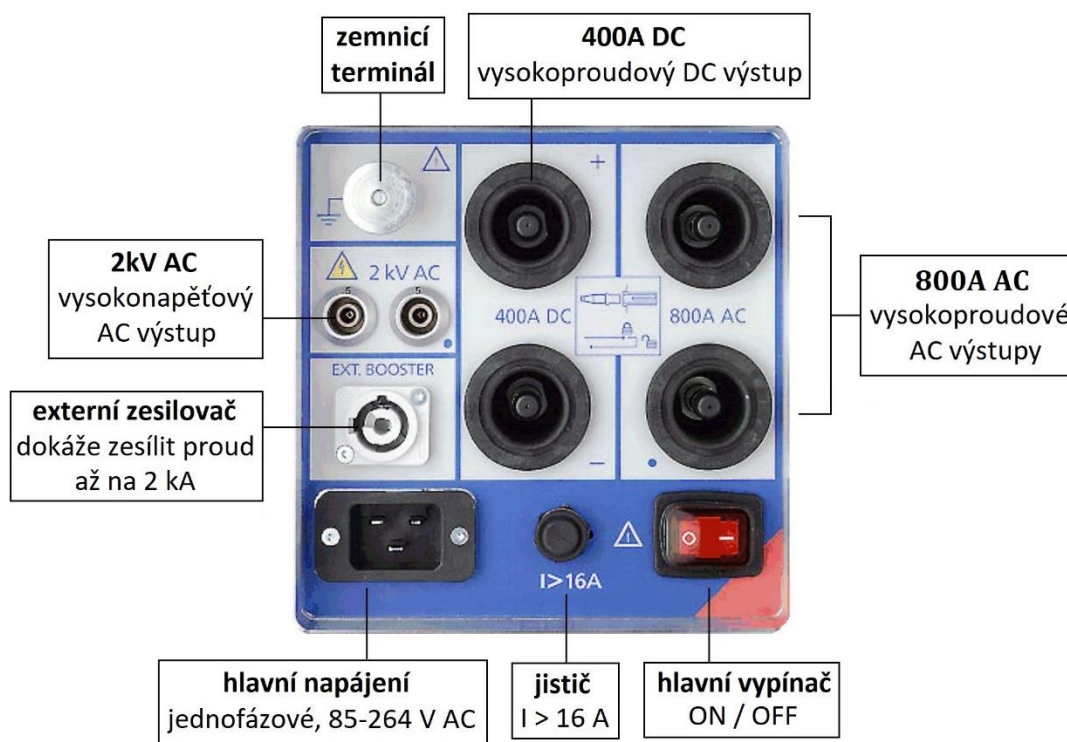
5.1.4 Technické parametry

Co se týče parametrů tohoto přístroje, vyžaduje klasické napájení ze sítě 230 V, 50 Hz. To ovšem při měření není k dispozici, jelikož se měří v terénu. Je tedy potřeba pro jeho napájení použít centrálu, která je dostatečně výkonná (nárazový proud 40 A peak – nárazový výkon 7 kW peak), aby zvládla proudový náraz při startu přístroje a jeho napájecí napětí nekleslo pod 190 V AC. Pokud by toto nebylo splněno, přístroj by nebyl schopen dodat svůj maximální jmenovitý výkon. [9] V následující tabulce jsou uvedeny typické hodnoty, které přístroj dodá z AC a DC výstupů. Hodnoty pro AC jsou zvýrazněny, protože při měření je použit pouze AC výstup – viz obrázek 20.

Tabulka 9: Typické hodnoty na AC a DC výstupu OMICRON CPC 100 [9]

Proud	Výkon	Doba trvání	Frekvence
6 A AC	330 VA	> 2 hod	50–200 Hz
6 A DC	360 W	> 2 hod	–

Pro úplnost je na následujícím obrázku ukázán i boční panel přístroje obsahující kromě hlavního napájení a vypínače také vysokoproudové a vysokonapěťové výstupy.



Obrázek 22: Popis bočního panelu OMICRON CPC 100 [9]

5.1.5 Výhody a nevýhody

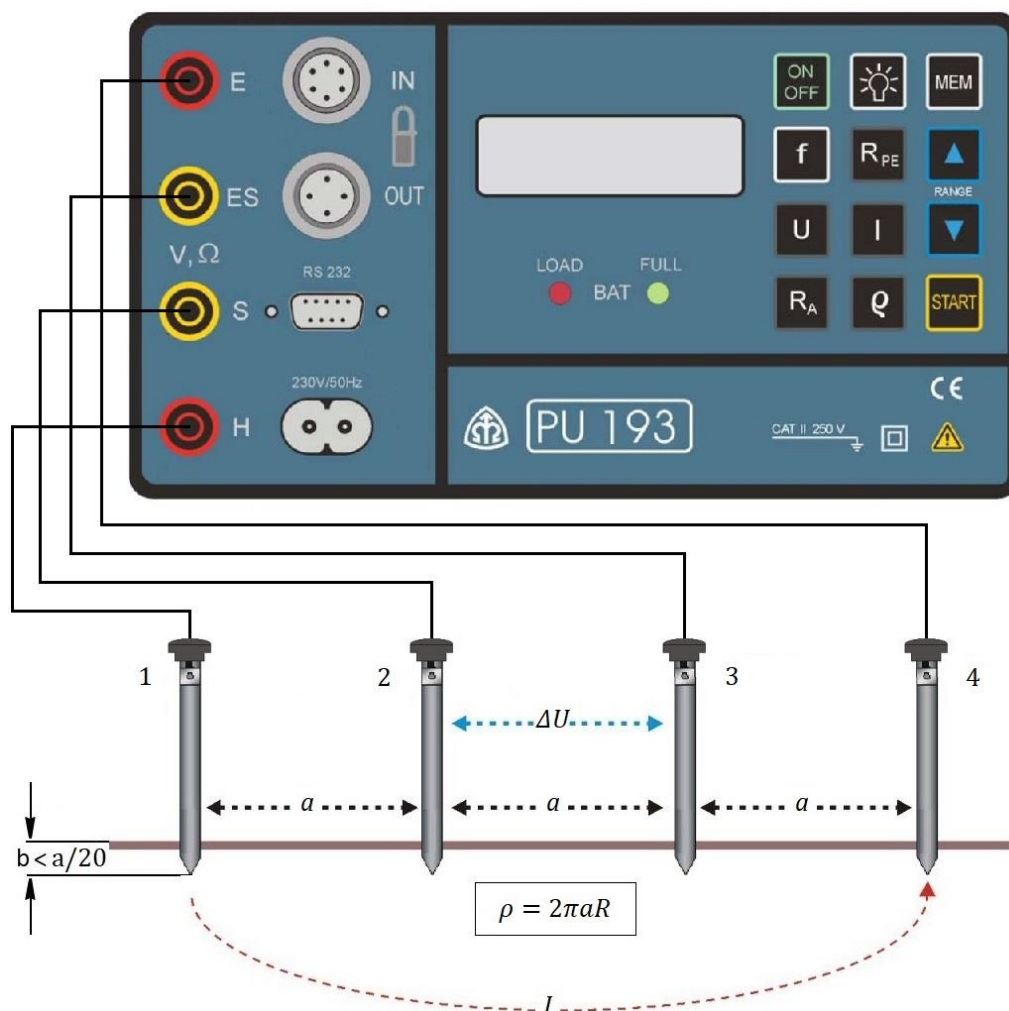
Výhodou tohoto přístroje je nastavení libovolné hodnoty proudu „I test“ (až po 6 A při zapojení do 6A AC vstupu) a libovolné frekvence z rozsahu 15–400 Hz. Praktickou výhodou je také délka kabelů k propojení přístroje s elektrodami. Součástí balení jsou 3 kabely délky 100 m a 1 kabel délky 50 m. Díky těmto délkám je možno uskutečnit měření s rozestupem elektrod až cca 65 m. Přístroj navíc neomezuje žádnými předem nastavenými rozestupy, které dokáže měřit. Obsluha si je tak může volit zcela libovolně (do cca 65 m).

Nevýhodou přístroje jsou jeho hmotnost (29 kg), rozměry (46,8 x 39,4 x 23,3 cm) a nutnost při měření v terénu mít vlastní napájecí zdroj s velkým požadovaným výkonem (3 kW a více), jelikož tyto zdroje (elektrocentrály) mají hmotnost 50 kg a více, je s měřením tímto přístrojem spojená špatná manipulovatelnost (pro jednoho člověka fyzicky náročné). Toto je zčásti řešeno bytelnou krabicí opatřenou vysouvacím madlem a dvěma kolečky, díky kterým je přístroj relativně chráněn proti rozbití v případě pádu a snáze se transportuje. Další nevýhodou je jeho složitost. Má velké množství funkcí a měřicích režimů, tudíž jeho ovládání není tak jednoduché a intuitivní. Mezi nevýhody, které stojí za zmínku, patří také kontrola uzemnění, kterou přístroj zjišťuje, je-li správně a dostatečně uzemněn. Více o této problematice v kapitole 6.2. Dále elektrody, které jsou součástí balení, nemají vhodně vyřešené vytahování. Pokud je půda tuhá a elektrody se musejí silou zatloukat, je pak problém je rukama vytáhnout. Další nevýhoda se týká výpočtu rezistivity. Přístroj vlastně neměří samotnou rezistivitu, nýbrž pouze odpor půdy R . Rezistivita musí být následně dopočítána zvlášť.

5.2 PU 193

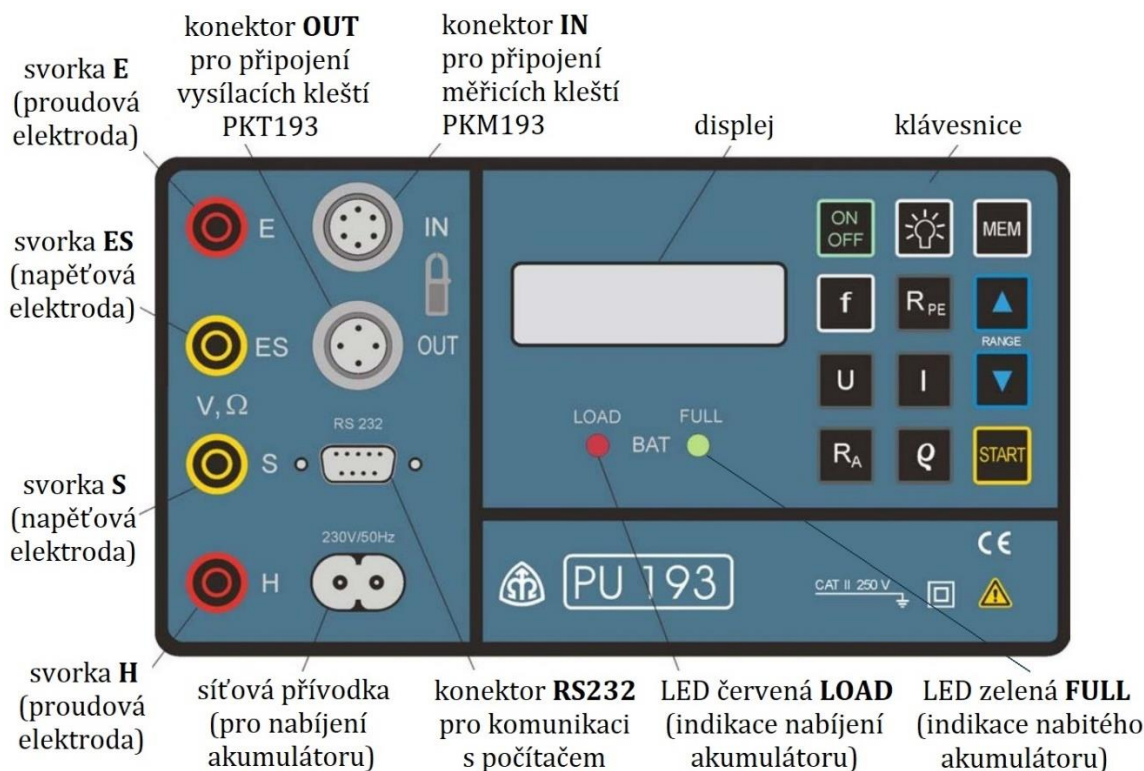
5.2.1 Schéma zapojení

Stejně jako u OMICRONu je tento přístroj nastaven na měření rezistivity půdy Wennerovou metodou a na následujícím obrázku je schéma jeho zapojení i s rozmístěním elektrod.



Obrázek 23: Schéma zapojení a rozmístění elektrod PU 193 [10]

5.2.2 Ovládání a nastavení



Obrázek 24: Popis čelního panelu PU 193 [10]

Přístroj je napájen z interní baterie, tudíž se nemusí externě napájet. Přístroj se zapíná stisknutím tlačítka „ON/OFF“ (v levé horní části klávesnice), čímž se rozsvítí displej. Pro měření rezistivity půdy se stiskne tlačítko „ρ“, nacházející se vedle tlačítka „START“, a na displeji se zobrazí totéž, co na následujícím obrázku.



Obrázek 25: Nastavení PU 193 na měření rezistivity půdy [10]

Nyní zbývá pouze nastavit velikost rozestupu elektrod. Přístroj je defaultně nastaven na 20 m. Při stisku tlačítka „▲“ nebo „▼“ je možné rozestup měnit. Přístroj má 12 výrobcem daných hodnot, mezi kterými si obsluha může vybrat – viz tabulka 10. Velikost proudu zde není možné nastavit ani nastavit, ani zobrazit. Výrobce v manuálu pouze uvádí její maximální hodnotu – 40 mA. Lze však nastavit frekvenci proudu. Stiskem tlačítka „f“ se na displeji namísto hodnoty rozestupu objeví automaticky nastavená frekvence – 128 Hz. Opětovným stiskem tlačítka „f“ je možné ji měnit. Na výběr jsou pouze 4 frekvence dané výrobcem – viz tabulka 10. Když je požadovaná frekvence proudu vybrána, opětovně zobrazení nastavené velikosti rozestupu je možné stiskem tlačítka „▲“ nebo „▼“. [10]

Tabulka 10: Hodnoty rozestupu elektrod a frekvence proudu PU 193 [10]

Rozestup elektrod (m)	0,5	1	1,5	2	2,5	3	5	10	15	20	25	30
Frekvence proudu (Hz)	59	95	128	140	–	–	–	–	–	–	–	–

Nakonec se stiskem tlačítka „START“ zahájí měření. Ozve se zvukový signál a na displeji se zobrazí hodnota rezistivity měřené půdy, která se však mění. Až se hodnota ustálí, ozve se další zvukový signál, který signalizuje, že měření skončilo a hodnota na displeji je tedy výsledkem měření. Tlačítka „▲“ nebo „▼“ je možno změnit rozestup a provést další měření. Frekvence proudu zůstává nastavená na poslední nastavené hodnotě i při restartu přístroje. Velikost rozestupu se však při každém zapnutí automaticky nastaví na hodnotu 20 m.

5.2.3 Princip výpočtu rezistivity

Princip výpočtu rezistivity je zde úplně stejný jako u OMICRONu – přístroj změří proud prošlý půdou a proudovou elektrodou, změří také napětí mezi napěťovými elektrodami a z těchto hodnot vypočítá odpor. Rozdíl je však v tom, že tento přístroj sám z naměřených hodnot vypočte výslednou rezistivitu.

Na obrázku 23 je naznačena rovnice, kterou přístroj používá pro výpočet rezistivity půdy:

$$\rho = 2\pi aR \text{ (}\Omega\text{m)} \quad (15)$$

Tato rovnice je však oproti rovnici (3) zjednodušená, protože neobsahuje konfigurační koeficient n , viz tabulka 2.

$$b < a/20 \text{ (m)} \quad (16)$$

Pokud jsou elektrody při měření v konfiguraci, která nesplňuje podmínku v rovnici (16), přístroj se při výpočtu rezistivity dopouští chyby a pro získání přesné hodnoty je nutno použít konfigurační koeficient n z tabulky 2 a dosadit ho do následující rovnice:

$$\rho_{sp} = \frac{2 \cdot \rho_{PU}}{n} \text{ (}\Omega\text{m)} \quad (17)$$

kde ρ_{sp} je správná hodnota rezistivity půdy a ρ_{PU} je hodnota rezistivity vypočtená přístrojem PU 193 (Ωm).

Když se tedy za ρ_{PU} dosadí z rovnice (15) a dosadí se do rovnice (17), získá se totéž, co v rovnici (3):

$$\rho_{sp} = \frac{2 \cdot \rho_{PU}}{n} = \frac{2 \cdot 2\pi aR}{n} = \frac{4\pi aR}{n} \text{ (}\Omega\text{m)}$$

5.2.4 Technické parametry

Přístroj je napájen vestavěným olověným akumulátorem 12 V/1,3 Ah. Maximální hodnota rezistivity, kterou je přístroj schopen naměřit, je 20 k Ωm . Pokud je naměřena vyšší, na displeji se zobrazí „>19.99 k Ωm “. Jeho pracovní podmínky jsou uvedeny v následující tabulce.

Tabulka 11: Pracovní podmínky PU 193 [10]

napájecí napětí	(12 ± 2) V
teplota	–5 až 40 °C
relativní vlhkost	max. 80 % při 23 °C
poloha přístroje	libovolná
magnetická indukce	0,1 mT

5.2.5 Výhody a nevýhody

Výhodou tohoto přístroje jsou jeho rozměry (17 x 22 x 12 cm) a hmotnost (2,3 kg). Díky tomu ho lze snadno přenášet. Další výhodou je jeho jednoduchost a intuitivnost ovládání. Praktickou výhodou, která stojí za zmínku, jsou elektrody a jednoduchý nástroj pro jejich vytahování, které jsou součástí balení. Je-li půda tuhá a elektrody se musejí silou zatloukat, není problém je i tak vytáhnout s pomocí zmíněného nástroje, jelikož mají čtvercový průřez, který přesně odpovídá tvaru výřezu na vytahovacím nástroji (viz obrázek 26). Stačí tedy elektrodami několikrát otočit dokola, případně je vyviklat do stran a pak není těžké je vytáhnout. Další výhodou je to, že přístroj vypočte rezistivitu sám. Je zde ovšem problém s přesností výsledné hodnoty (podrobněji popsáno v kapitole 5.2.3).



Obrázek 26: Elektrody s vytahovacím nástrojem PU 193

První praktickou nevýhodou u tohoto přístroje je délka kabeláže, která je součástí balení. To obsahuje 1x 40 m, 2x 25 m a 2x 3 m kabelu. Zajímavostí je, že ačkoli má přístroj přednastavené hodnoty rozestupu elektrod až 30 m, s takto dlouhými kabely je možné měřit maximálně s rozestupem 20 m. Další nevýhodou jsou zmíněné přednastavené hodnoty rozestupu. Měření je tak limitováno 12 hodnotami (viz tabulka 10) a nelze měřit například s rozestupy nad 30 m, i když je k dispozici dostatečně dlouhá kabeláž. Totéž platí pro nastavení frekvence proudu, kterou si obsluha také nemůže nastavit libovolně. K dispozici jsou pouze 4 přednastavené hodnoty (viz tabulka 10). Při měření chybí údaj o velikosti proudu, který přístroj pouští do země. Z manuálu je známa pouze jeho maximální hodnota.

6 PRAKTICKÝ POSTUP MĚŘENÍ REZISTIVITY PŮDY

V této kapitole je popsán postup, jakým byla provedena terénní měření v rámci této práce. Jsou zde uvedeny i praktické poznatky, které byly získány během měření, a podmínky pro to, aby měření byla opakovatelná.

6.1 Příprava před měřením

Pokud je požadavek na opakování již uskutečněného měření, mělo by to stávající v ideálním případě být provedeno ve stejné roční době a za stejného počasí, a to nejen během měření, ale i dostatečnou dobu před ním. Je to důležité proto, aby měřená půda měla stejnou teplotu a vlhkost a aby byl například stejný stav spodních vod, které, pokud se v dané lokalitě v měřené hloubce vyskytují, rovněž ovlivňují výsledky měření. Teplota a vlhkost půdy nezávisí jen na aktuálním stavu počasí. Tím je půda ovlivněna jen do prvních několika desítek cm své hloubky. V hloubkách větších než 1 m se například změna teploty projevuje s několikadenním zpožděním a okolo 20 m již teplota odpovídá průměrné roční teplotě v dané oblasti. Přítomnost porostu také ovlivňuje (zpomaluje) pronikání tepla do půdy. 0

Místa, kde se rezistivita půdy měří, jsou často špatně dostupná. Proto je pro bezproblémovou dopravu výhodou terénní auto (zvláště je-li po dešti), popř. náradí pro vyproštění zapadlého auta. Samotné místo měření může být zarostlé různými druhy rostlin, které mohou být chráněné zákonem. V takových místech se nedoporučuje měřit, protože by rostliny mohly být poničeny. Pokud však rostliny chráněné nejsou a mají například trny (viz obrázek 27), je praktické mít s sebou mačetu nebo sekeru. Vybavení, potřebné pro měření rezistivity, je v příloze D.



Obrázek 27: Porost na místě měření 2

6.2 Uspořádání elektrod a poloha měřicího stanoviště

Pro měření byly použity 2 měřicí přístroje (OMICRON CPC 100 a PU 193). Bylo tak možno spojit některé jejich výhody: Pro všechna měření byla například použita kabeláž od OMICRONu, čímž byl vyřešen problém s krátkou kabeláží od PU, která umožňovala měřit maximálně s rozestupem 20 m (viz kapitola 5.2.5). U všech měření byly naproti tomu použity elektrody od PU kvůli snazšímu vytahování. Další výhodou použití více přístrojů bylo, že se nevyužité elektrody od OMICRONu mohly použít k jeho uzemnění, které přístroj vyžaduje. Po použití všech čtyř elektrod však přístroj stále vyhodnocoval uzemnění jako nedostatečné, a tak musela být v jeho nastavení deaktivována kontrola uzemnění („Disable ground check“), jinak by ani nedovolil měření zahájit. Zajímavostí je, že k tomuto přístroji není k dispozici žádný zemnič, což může vést k ohrožení obsluhy v případě poruchy.



Obrázek 28: Uspořádání elektrod a měřicí stanoviště při měření 3

Elektrody byly zatloukány do země do hloubky cca 30 cm. Pro zatloukání elektrod je vhodné mít s sebou na měřeném místě kladivo. Uspořádání elektrod pro $a = 0,5$ m je na obrázku 28 (zvýrazněno červenými kružnicemi).

Pokud má být opakováno v minulosti uskutečněné měření, je také vhodné dodržet polohu středu měření a směr, ve kterém jsou elektrody od něj umístěny (směr měření). Pokud je jeden z těchto parametrů změněn, mohou se výsledky měření značně lišit. V kapitole 3.1.1 je zmíněno, že elektrody mají být umístěny v přímce. Při malých rozestupech to není problém dodržet, ale při větších (cca nad 5 m) je potřeba využít vhodných pomůcek ke správnému umístění elektrod. Buď se použije špagát o délce alespoň $3 \cdot a_{max}$ [a_{max} je hodnota největšího rozestupu elektrod (m)], který bude mít takovou barvu, která dobře kontrastuje s okolním prostředím, nebo podobně dlouhé měřicí pásmo, které zastoupí funkci špagátu a měřidla najednou. – Pomůže udržet elektrody v přímce a také naměřit správně rozestupy mezi nimi. Jestliže není dán směr, ve kterém se má

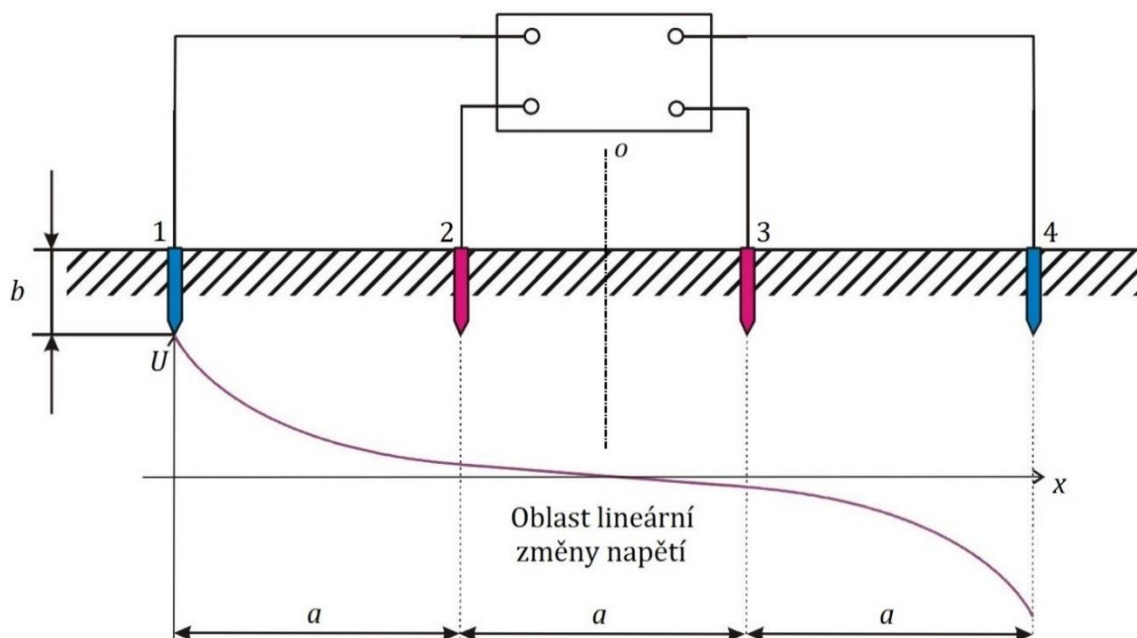
6 Praktický postup měření rezistivity půdy

rezistivita půdy měřit, a není k dispozici ani špagát, ani pásmo (jak tomu bylo u měření v rámci této práce), nezbyvá než využít orientačních bodů v krajině (po obou stranách od středu měření), se kterými budou elektrody vždy v přímce. Aby byly elektrody v přímce, je možné se orientovat také např. podle rovnoběžných pruhů na povrchu půdy (pokud se v daném místě nacházejí) – viz obrázek 64. Pro měření větších rozestupů, kdy již klasický svinovací metr nedostačuje, je možné využít například digitální rolmetr.

Pokud je měřena půda v blízkosti elektrického vedení, měl by být směr měření kolmý na dráty vedení, aby se z něj do kabelů spojujících měřicí přístroj s elektrodami neindukovalo napětí a neohrozilo tak obsluhu, viz obrázek 53.

Při měření se osvědčil následující způsob změny rozestupu elektrod: Začíná-li se od toho nejmenšího, střed měření zůstává stále na stejném místě (které je dobré mít viditelně označené) a elektrody se od něj postupně vzdalují. Tento postup má 2 výhody:

- První je praktického rázu: Pokud si chce obsluha ušetřit práci se zatloukáním a vytahováním elektrod, může využít toho, že při zvětšení rozestupu na trojnásobek stačí vytáhnout ty vnitřní (napěťové) a zatlouct je jako vnější (proudové) pro nový rozestup. Lze to tak udělat proto, že proudové elektrody při rozestupu a jsou ve stejné vzdálenosti jako napěťové elektrody při rozestupu $3a$. Osvědčená posloupnost hodnot a (m) je tedy následující: $0,5 \rightarrow 1,5 \rightarrow 1 \rightarrow 3 \rightarrow 2,5 \rightarrow 2 \rightarrow 5 \rightarrow 15 \rightarrow 10 \rightarrow 30 \rightarrow 25 \rightarrow 20$
- Druhá se týká bezpečnosti: Obsluha by se při probíhajícím měření měla nacházet na pomyslné ose měření o procházející jeho středem (viz obrázek 29). Na obrázku je vykreslena křivka potenciálového spádu podél elektrod. U proudových elektrod je spád největší – pro obsluhu je zde nejvyšší riziko úrazu krokovým napětím. Naopak nejmenší (nulový) spád je ve středu měření, kde je tím pádem pro obsluhu bezpečno. Tam, kde se nachází obsluha v době měření, je i stanoviště s měřicím přístrojem. Proto je výhodou, když se při změně rozestupu nemění poloha středu měření, neboť by se obsluha vždy buďto dostávala na místo většího potenciálového spádu, čímž by se vystavovala nebezpečí, nebo by muselo být stanoviště pokaždé přesunuto na osu o , což je nepraktické.



Obrázek 29: Potenciálový spád při probíhající měření [16]

Jestliže se k měření využívá přístroj OMICRON (nebo jemu podobný), který vyžaduje napájení ze sítě, je nutno počítat také s elektrocentrálou, která má zpravidla ještě větší rozměry než samotný přístroj. Alternativou pro napájení je baterie s výkonovým měničem, což ale není tak snadno dostupné. OMICRON se dá položit na krabici, ve které je transportován, ale pro PU je vhodnější mít například campingový stůlek (viz obrázek 28), aby obsluha přístroj nemusela mít po celou dobu měření zavěšený na krku nebo ho neustále zvedat ze země.

Zapojení a nastavení měřicích přístrojů je vysvětleno v kapitole 4. Samotné měření trvá několik vteřin. Pokud se zkoumá i proudová nebo frekvenční závislost naměřených výsledků, čas měření pro jeden rozestup stoupne na několik minut. Časově nejnáročnější je však změna uspořádání elektrod. V případě měření 12 rozestupů bylo potřeba vyhradit pro jedno měření jeden den, neboť samotné měření trvá 4–5 hodin.

7 VYTVOŘENÍ DVOUVRSTVÉHO MODELU

V této kapitole je popsáno zpracování naměřených hodnot. Za účelem možnosti jejich jednoduchého zpracování bylo vytvořeno grafické uživatelské rozhraní (GUI) v matlabovském prostředí App Designer. Ze všech tří měření v rámci této práce (pro rozestupy 0,5–30 m) byl pomocí GUI vytvořen dvouvrstvý model Wennerovy metody.



Obrázek 30: GUI těsně po spuštění

Na obrázku 30 je rozložení tlačítek, zadávacích polí a dalších prvků GUI po jeho spuštění. Vlevo nahoře v zeleném rámečku se zvolí jeden ze dvou režimů – „Mam namerene ODPORY“ (např. z přístroje OMICRON CPC 100), nebo „Mam namerene REZISTIVITY“ (např. z přístroje PU 193). Pod tímto se nachází rozbalovací seznam, v němž se volí, zda se vstupní hodnoty k vytvoření dvouvrstvého modelu budou zadávat ručně, nebo se nechají zobrazit ukázková měření. Ukázkových měření je v seznamu šest. – Tři jsou modelová a tři reálná. Modelová měření jsou vytvořena uměle – simulací v programu Ansys a reálná jsou měření prováděná v rámci této práce. Pokud je zvolen režim „Mam namerene ODPORY“ (dále jen ODPORY) a vybráno jedno z reálných ukázkových měření, program vybere hodnoty naměřené přístrojem OMICRON CPC 100. Pokud je zvolen režim „Mam namerene REZISTIVITY“ (dále jen REZISTIVITY) a vybráno jedno z reálných ukázkových měření, program vybere hodnoty naměřené přístrojem PU 193. Dále bude popsána pouze varianta, kdy je zvolena možnost „Zadne – chci vyplnit rucne“. Do žlutě zbarveného pole se zadá počet rozestupů, pro které je provedeno měření a stiskne se žlutě zbarvené tlačítko „Nastavit pocet mereni“.

7 Vytvoření dvouvrstvého modelu

☒ Mam naměřené ODPORY
☐ Mam naměřené REZISTIVITY

Ukazková měření: Zadne - chci vyplnit ručně ▼

b (m) 0.3 Rho1 vypočítat pro a <= 0.5 m
 Rho1 (Ohm.m) 0

Císlo měření	a (m)	R (Ohm)	Rho (Ohm.m)
1	0	0	0
2	0	0	0
3	0	0	0
4	0	0	0
5	0	0	0
6	0	0	0
7	0	0	0
8	0	0	0
9	0	0	0
10	0	0	0
11	0	0	0
12	0	0	0

Zavislosti tloustky povrchove vrstvy h na koeficientu k pro jednotlivé rozestupy elektrod a

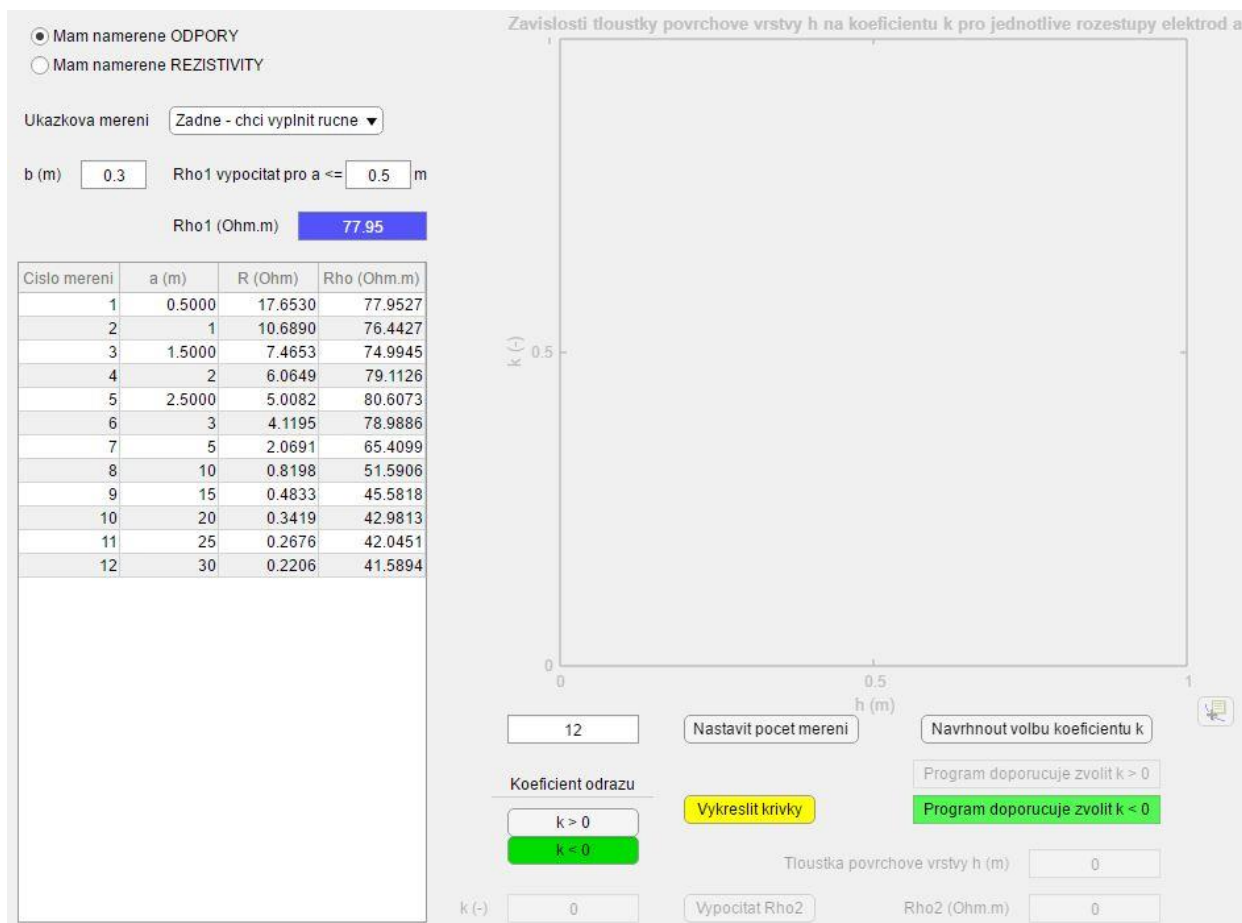
0.5
 0
 0.5
 1
 h (m)

12 Nastavit počet měření Navrhnout volbu koeficientu k
 Koeficient odrazu Vykreslit křivky Program doporučuje zvolit k > 0
 k > 0 k < 0 Program doporučuje zvolit k < 0
 Tloustka povrchove vrstvy h (m) 0
 k (-) 0 Vypočítat Rho2 Rho2 (Ohm.m) 0

Obrázek 31: GUI po stisknutí tlačítka „Nastavit počet měření“

Po stisknutí tlačítka „Nastavit počet měření“ se tabulka vlevo na obrázku 31 vyplní stejným počtem řádků, jako bylo nastaveno v předchozím kroku, z nichž každý odpovídá měření pro jeden rozestup. V režimu ODPORY má tabulka 4 sloupce. – Z naměřených odporů budou spočítány rezistivity, které se následně zobrazí ve 4. sloupci. V režimu REZISTIVITY má tabulka pouze 3 sloupce (chybí sloupec s odpory). Druhý a třetí sloupec jsou v obou případech editovatelné, aby do nich mohly být vepsány naměřené hodnoty. Pro názornost byly sloupce vyplněny výsledky měření 3. Do žlutě zbarveného pole s označením „b (m)“ se zadá hloubka zaražení elektrod b (při měření 3 – 0,3 m) a do sousedního žlutého pole se zadá hodnota maximálního rozestupu, pro který se určí rezistivita povrchové vrstvy půdy – $Rho1$. Jako rezistivita povrchové vrstvy půdy je standardně považována hodnota z měření pro rozestup 0,5 m. Tato hodnota byla určena na základě konzultace s vedoucím práce. Následně se stiskne žlutě zbarvené tlačítko „Navrhnout volbu koeficientu k “.

7 Vytvoření dvouvrstvého modelu



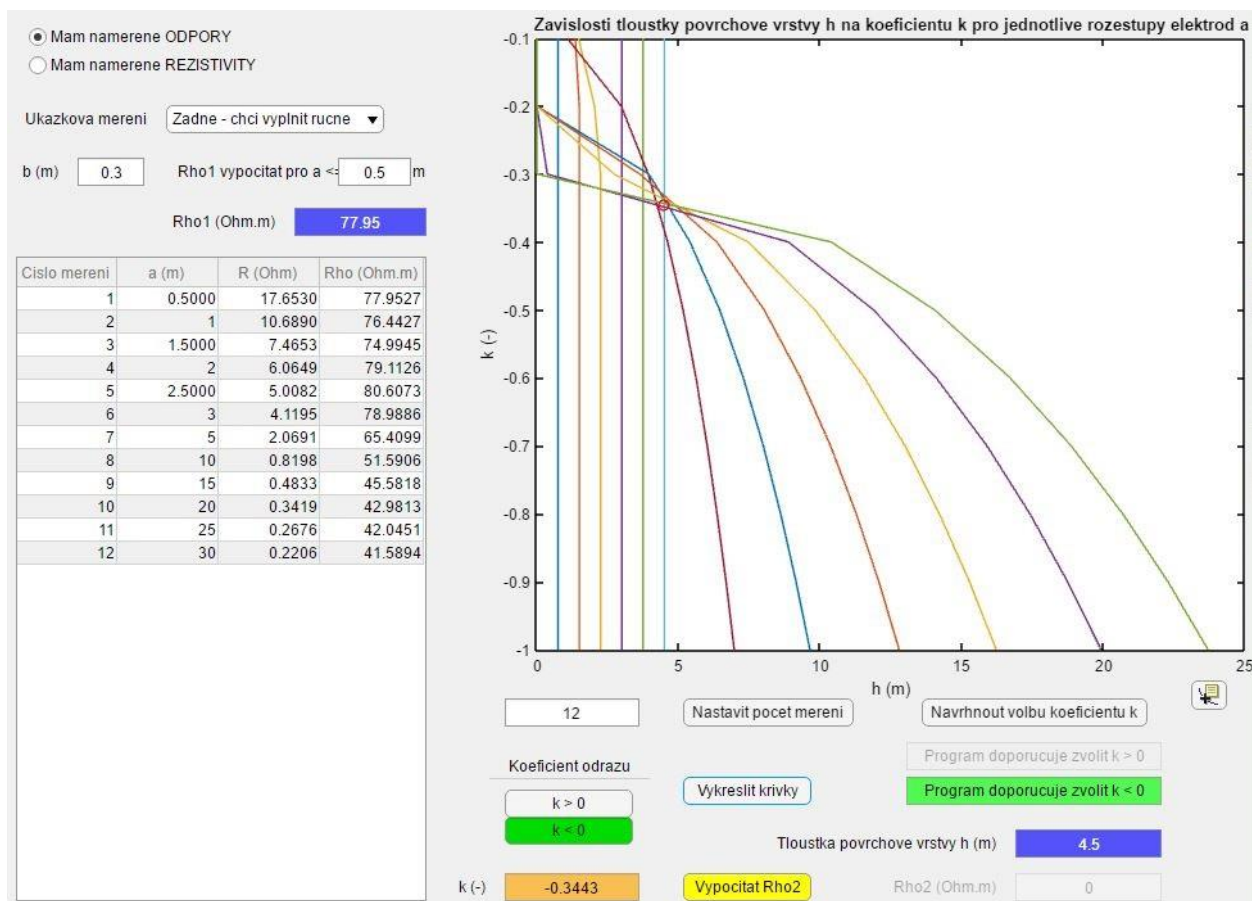
Obrázek 32: GUI po stisknutí tlačítka „Navrhnout volbu koeficientu k “

V tomto kroku je potřeba zjistit, zda je koeficient odrazu k kladný, nebo záporný – viz rovnice (4):

$$k = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} (-)$$

Je tedy potřeba určit hodnotu $\rho_1 = Rho1$ a $\rho_2 = Rho2$. Po stisknutí tlačítka „Navrhnout volbu koeficientu k “, v režimu ODPORY program použije rovnici (3) a z hodnot a, b a R vypočítá rezistivity pro všechny rozstupy. V režimu REZISTIVITY pouze načte zadané rezistivity z tabulky. Poté načte hodnotu maximálního rozestupu, pro který se má vypočítat $Rho1$, vypočítá aritmetický průměr odpovídajících rezistivit a výslednou hodnotu vepíše do modře zbarveného pole na obrázku 32. Přesnou hodnotu $Rho2$ v této fázi určit nelze, neboť je k tomu potřeba hodnota k . K zjištění, je-li k kladné, nebo záporné, program načte hodnotu rezistivity pro největší rozstup $Rhoend$ a porovná ji s hodnotou $Rho1$. Pokud je $Rhoend$ větší než $Rho1$, pole s nápisem „Program doporučuje zvolit $k > 0$ “ se zbarví zeleně (viz obrázek 32) a program vybere přepínací tlačítko „ $k > 0$ “, které se rovněž zbarví zeleně. Pokud je $Rhoend$ menší než $Rho1$, pole s nápisem „Program doporučuje zvolit $k < 0$ “ se zbarví zeleně a program vybere přepínací tlačítko „ $k < 0$ “, které se rovněž zbarví zeleně. Vždy je však ponechána možnost vybrat opačné přepínací tlačítko. Může totiž nastat případ, že měřená půda je spíše homogenní – naměřené hodnoty se příliš neliší – ale pokud by se poslední hodnota výrazněji lišila od ostatních, mohl by program určit opačnou polaritu k . Následně se stiskne žlutě zbarvené tlačítko „Vykreslit krivky“.

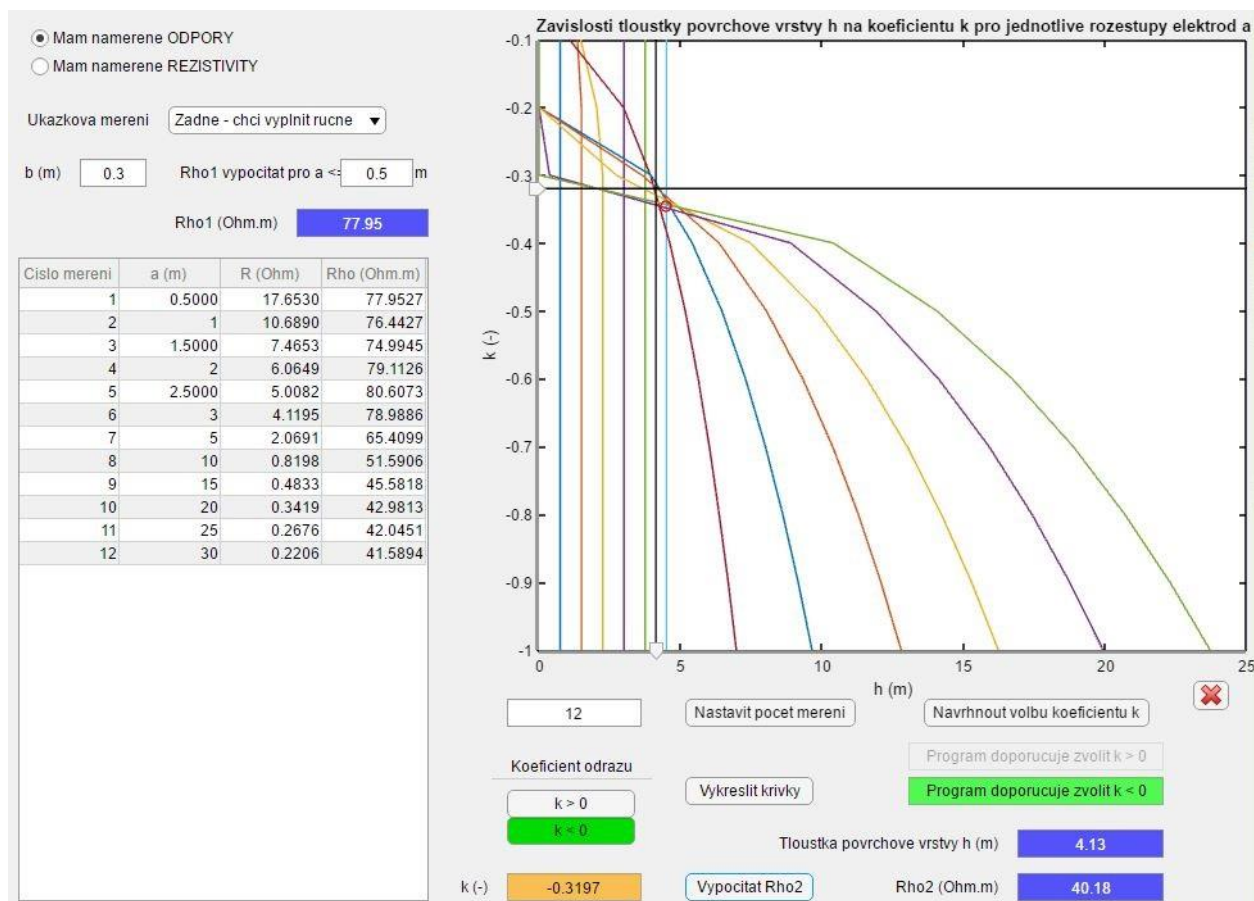
7 Vytvoření dvouvrstvého modelu



Obrázek 33: GUI po stisknutí tlačítka „Vykreslit křivky“

Po stisknutí tlačítka „Vykreslit křivky“ proběhne postup z kapitoly 3.1.2.2. Problém však může nastat, pokud se křivky neprotínají v jednom místě. Tento problém částečně řeší funkce *Curve Intersection* pro automatické vyhledání průsečíku křivek z [17]. Takto nalezený průsečík je automaticky zobrazen v grafu na obrázku 33. Souřadnice průsečíku h je programem vepsána do modře zbarveného pole vpravo dole (pole h) a souřadnice k je vepsána do oranžově zbarveného pole ve spodní části obrázku (pole k). Při použití dvouvrstvého modelu je nutné měřit pro dostatečně velké rozestupy – jednak proto, aby byla správně určena polarita k , a také pro dostatečný počet křivek, které se protnou. Z obrázku 33 je vidět, že polovina křivek jsou svislé čáry. Je to zapříčiněno tím, že při daném rozestupu byla hodnota poměru ρ/ρ_1 žádná hodnota v tabulce 4. Tyto čáry se nepočítají mezi křivky tvořící průsečík. Následně se stiskne žlutě zbarvené tlačítko „Vypočítat Rho2“.

7 Vytvoření dvouvrstvého modelu



Obrázek 34: GUI po stisknutí tlačítka „Vypocitat Rho2“

Pokud je průsečík, nalezený programem, nevyhovující, je možnost nastavit jeho souřadnice ručně. Je to umožněno stisknutím tlačítka s ikonkou pod grafem na obrázku 33. Objeví se 2 posuvníky shodující se s osami grafu – viz obrázek 34. Zároveň s nimi, se v grafu vykreslí 2 černé čáry – jedna svislá (pro posuvník na vodorovné ose) a jedna vodorovná (pro posuvník na svislé ose). Tyto čáry sledují pohyb posuvníků a slouží pro přesné určení průsečíku křivek. Hodnoty h a k se při pohybu posuvníků vepisují do pole h a k v reálném čase. V grafu je možné i přibližovat a oddalovat (kolečkem myši nebo kliknutím levého tlačítka myši do grafu), ale pouze, když jsou posuvníky vypnuty – opětovným stisknutím tlačítka s ikonkou pod grafem. Jakmile je průsečík nalezen, stiskne se tlačítko „Vypocitat Rho2“ a z rovnice (5) je vypočtena hodnota $Rho2$ (ρ_2), kterou program vepíše do modře zbarveného pole pod polem h .

Hodnoty z modře zbarvených polí na obrázku 34 charakterizují dvouvrstvý model půdy a jsou použity jako jedny ze vstupních parametrů pro model, který je popsán v následující kapitole.

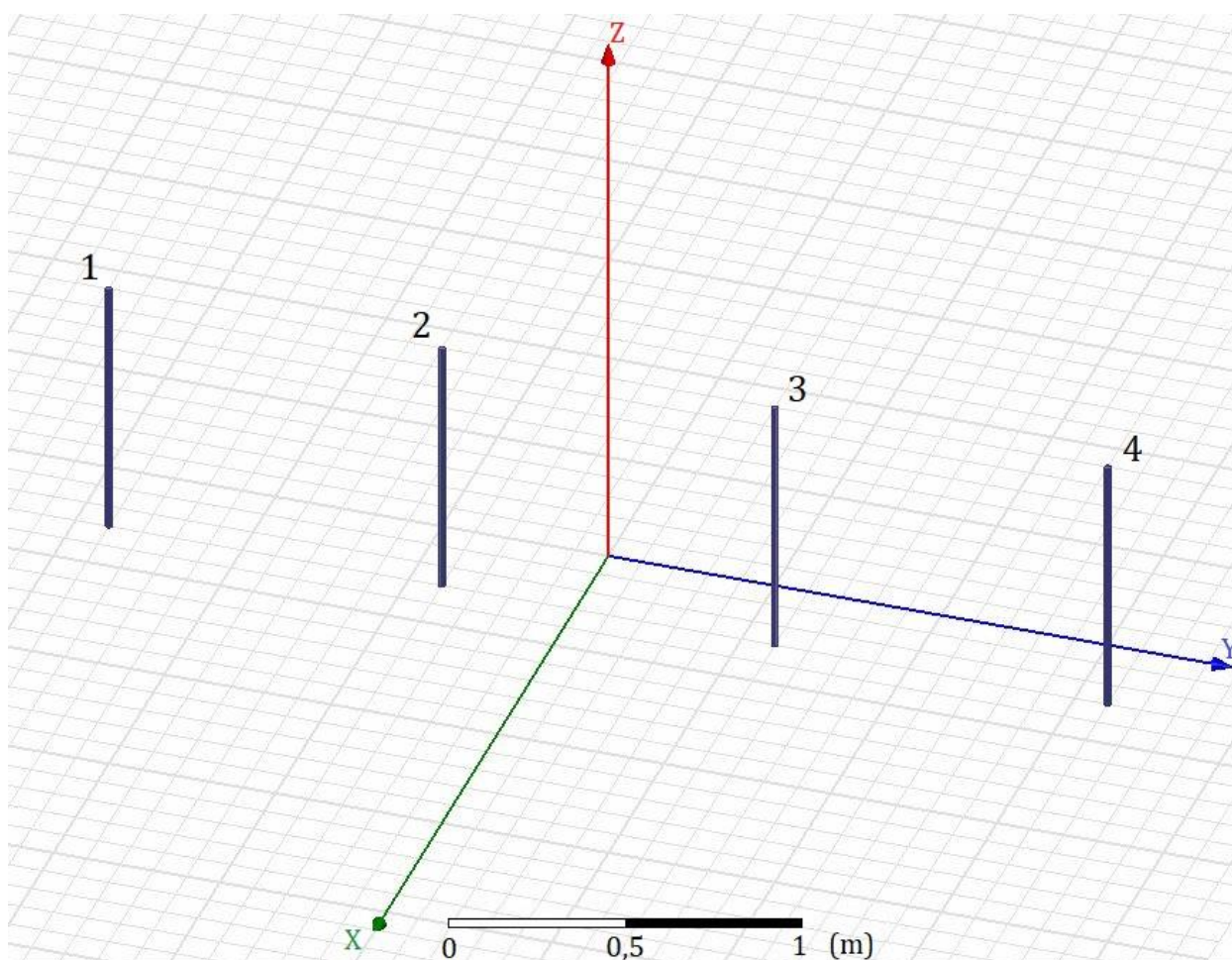
GUI je přiloženo k práci na datovém nosiči i se všemi soubory k jeho správné funkci. Funkce pro automatické vyhledání průsečíku křivek *Curve Intersection* je pojmenovaná jako „InterX“.

8 SIMULACE DVOUVRSTVÉHO MODELU

Simulace dvouvrstvého modelu byly prováděny v programu Ansys. V této kapitole je popsána tvorba modelu, nastavení vstupních parametrů a následně je uveden popis výstupních parametrů. Simulace se provádí za účelem ověření přesnosti dvouvrstvého modelu pro modelování zemničů, modelování Wennerova měření atp. Výsledné hodnoty jsou porovnány s naměřenými.

8.1 Tvorba 3D modelu, nastavení a spuštění simulace

Jelikož je vytvářen 3D model, je třeba po spuštění Ansoftu nejprve vložit projekt v režimu „Maxwell 3D Design“. Poté se vybere druh analýzy – „Electric DC Conduction“. Simulace se tedy neprovádí pomocí střídavého proudu (jako měření), nýbrž pomocí stejnosměrného. Následuje tvorba samotného modelu.

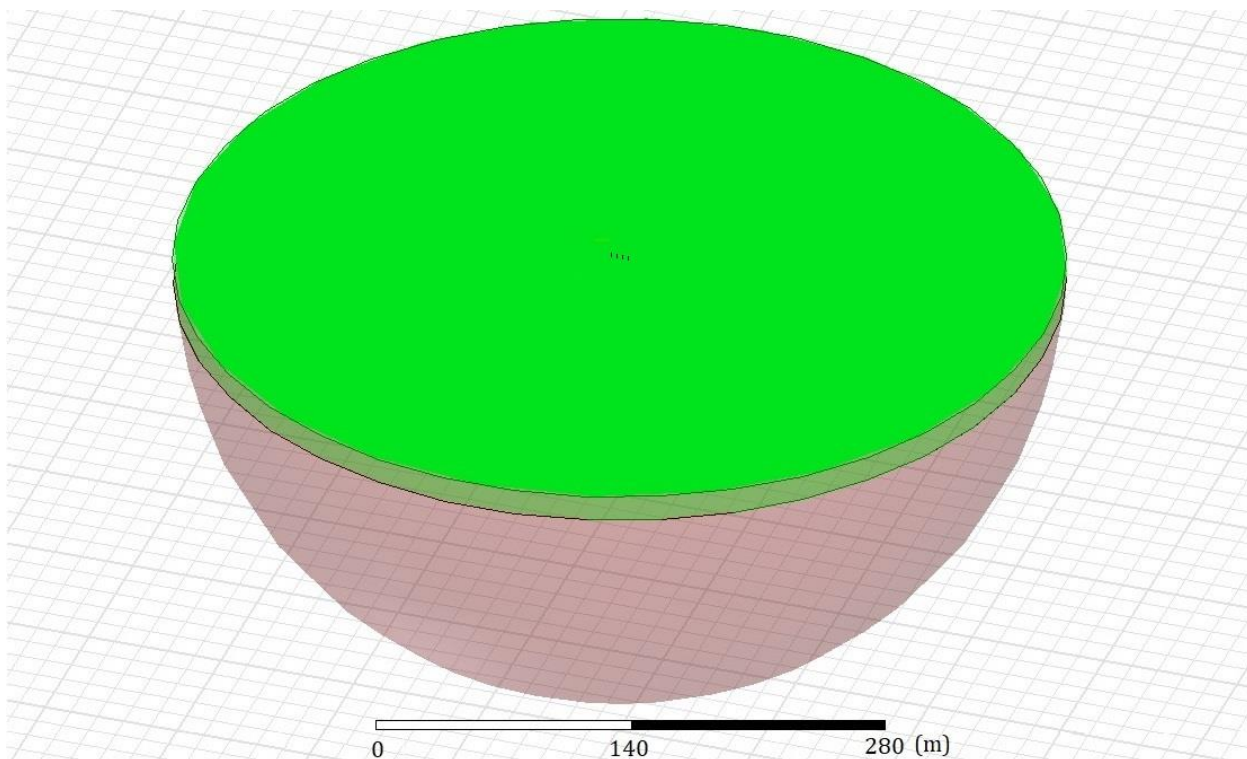


Obrázek 35: Model – elektrody

Nejdříve se nakreslí elektroda 1 – viz obrázek 35. Střed měření je zvolen v počátku soustavy souřadnic. Elektroda se nakreslí ve vzdálenosti $1,5 \cdot a$ od osy Z a bude mít průřez pravidelného mnohoúhelníku. Výška elektrody nad zemí (nad osou Y) nemá na výsledek simulace vliv. Důležité je nastavit správnou hloubku zaražení b (pod osou Y). Nyní se elektroda zkopíruje 3x s požadovaným rozstupem a .

8 Simulace dvouvrstvého modelu

Následuje model půdy. Nakreslí se koule se středem v počátku soustavy souřadnic. Autorem práce bylo zjištěno, že čím větší je poloměr koule r (představující půdu), tím přesnější jsou výsledky simulace. Rozměry objektů jsou však limitovány hardwarovým vybavením počítače, na které se simulace provádí. Následně se koule rozdělí podél osy Z , vrchní část se smaže a oddělí se povrchová vrstva od spodní podél osy Z v hloubce h (z GUI). Elektrody se nyní překrývají s půdou v záporném poloprostoru podél osy Z . Aby simulace mohla zdárně proběhnout, je důležité překrývající se prostory od sebe odečíst. Dvouvrstvá půda s elektrodami je na obrázku 36.



Obrázek 36: Model – půda s elektrodami

Program požaduje stanovení hranic prostoru, ve kterém provede simulaci. Proto se vytvoří objekt region, u kterého se nastaví, o kolik procent budou jeho rozměry větší než největší rozměry nakresleného modelu.

V dalším kroku se nakresleným prvkům přiřadí materiály s příslušnými vlastnostmi. Pro simulaci jsou důležité hodnoty relativní permitivity ε a měrné vodivosti σ . ε půdy je možné určit například z obrázků 17 a 18. Pro materiál elektrod se nastaví hodnota σ odpovídající materiálu použitých elektrod (nejčastěji železných). Pro povrchovou vrstvu se σ určí jako $1/Rho1$ a pro spodní vrstvu jako $1/Rho2$. Ve vlastnostech vytvořených objektů, kterým je přiřazen materiál, je nutno zaškrtnout možnost „Solve inside“, aby byla simulace provedena uvnitř těchto objektů. Jediným objektem, kde toto zaškrtnuto nebude, je region, kterému se materiál nepřikazuje.

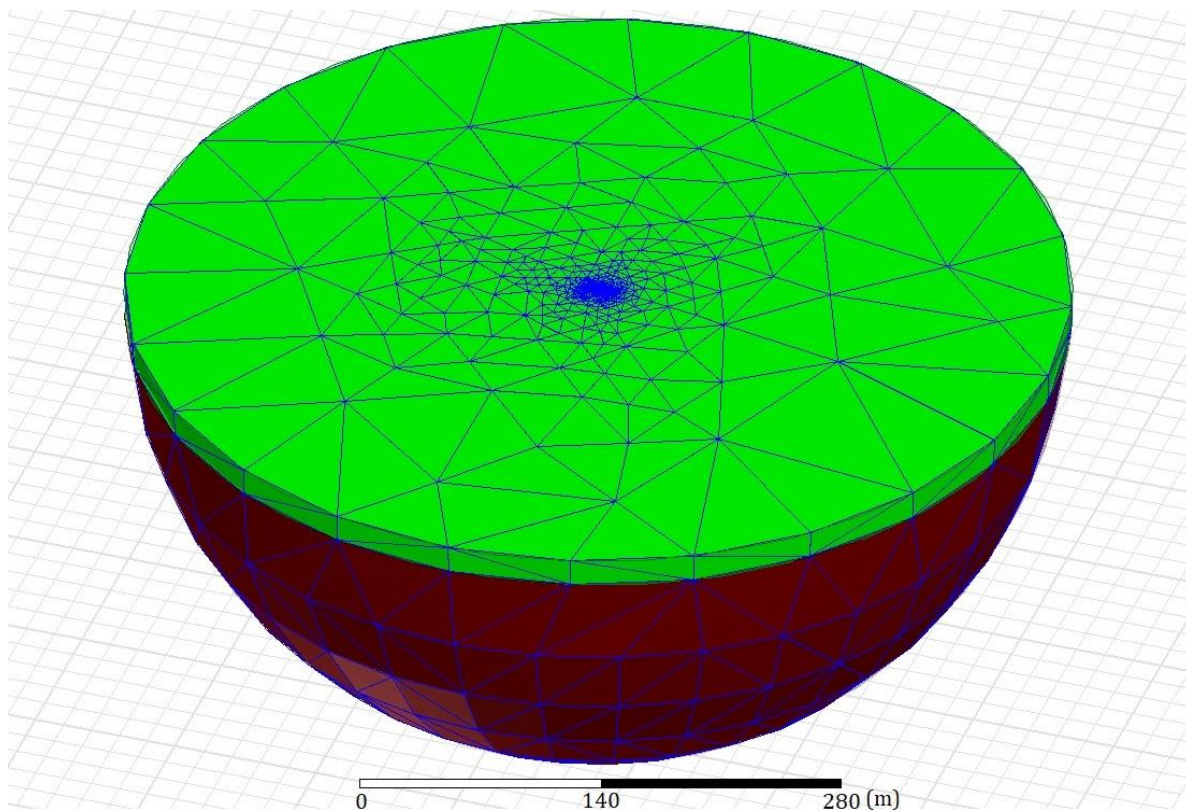
Dále se nastaví zdroje elektrického pole. Standardně je v Ansysu při kliknutí na objekt nastaveno vybírání celých objektů. Nyní je potřeba změnit nastavení na vybírání ploch. Poté se vybere vrchní plocha elektrody 1, neboť touto plochou bude do systému vtékat proud. V nastavení proudového zdroje se nastaví libovolná hodnota proudu – například v jednotkách ampérů. Následně se vybere vrchní plocha elektrody 4 a nastaví se jako „Sink“. To znamená, že se do tohoto místa budou stékat všechny proudy ze systému.

V nastavení simulace se nastaví počet iterací (Number of Passes) a procentní chyba výpočtu e (Percent Error). Čím vyšší počet iterací, tím se prodlužuje délka simulace a hardwarové nároky. Nepřímo úměrně to platí i pro e . Před spuštěním simulace je možné nechat zkontrolovat projekt, zda se v něm nevyskytují chyby, kliknutím na „Validate“. Zelená fajfka značí, že je vše v pořádku; žlutý vykřičník znamená drobné nedostatky v nastavení, ale i přesto je možné simulaci spustit; červený křížek signalizuje závažné nedostatky, které musí být odstraněny, jinak simulaci nebude možné spustit.

Poté co se spustí simulace (příkazem „Analyse“), je možné sledovat její průběh ve výpočtovém okně vpravo dole. Autor této práce doporučuje sledovat výkon počítače (zvláště při nastavení simulace na vyšší počet iterací nebo nižší e), zda nehrozí jeho přetížení. Simulaci je možné předčasně ukončit příkazem „Abort“ ve výpočtovém okně.

8.2 Výsledky simulace

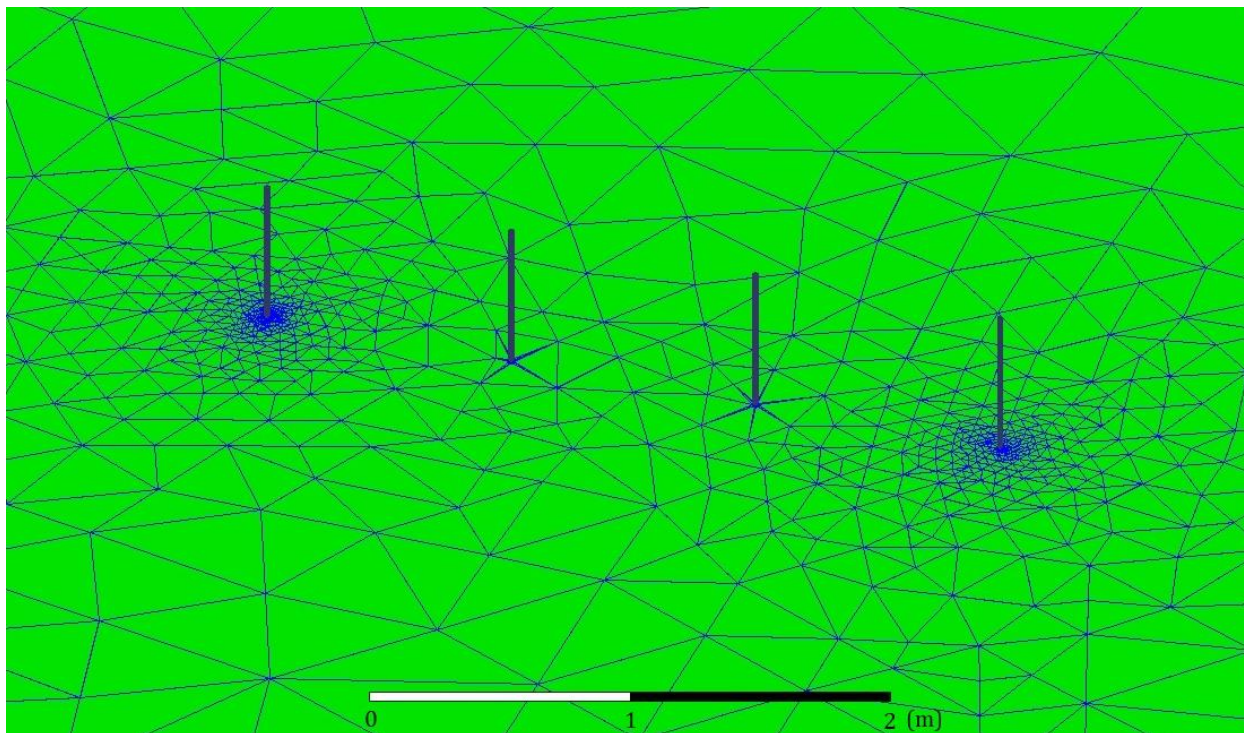
Během simulace program rozloží objekty na síť konečných prvků – čtyřstěnů, pro které provádí analýzu, a v jednotlivých iteracích stále přidává počet čtyřstěnů, dokud odchylka od požadovaného stavu neklesne pod nastavenou hodnotu (Percent Error). Po skončení simulace je možné nechat zobrazit síť konečných prvků na vybraných objektech – viz následující obrázek.



Obrázek 37: Síť konečných prvků – půda

8 Simulace dvouvrstvého modelu

Z obrázku 37 je vidět, že se síť směrem k elektrodám postupně zhušťuje. Při přiblížení na elektrody vypadá síť následovně.



Obrázek 38: Síť konečných prvků – elektrody

Z obrázku je vidět, že v místech, kde z elektrody 1 vstupuje proud do půdy a z půdy vystupuje do elektrody 4, je největší hustota čtyřstěnnů.

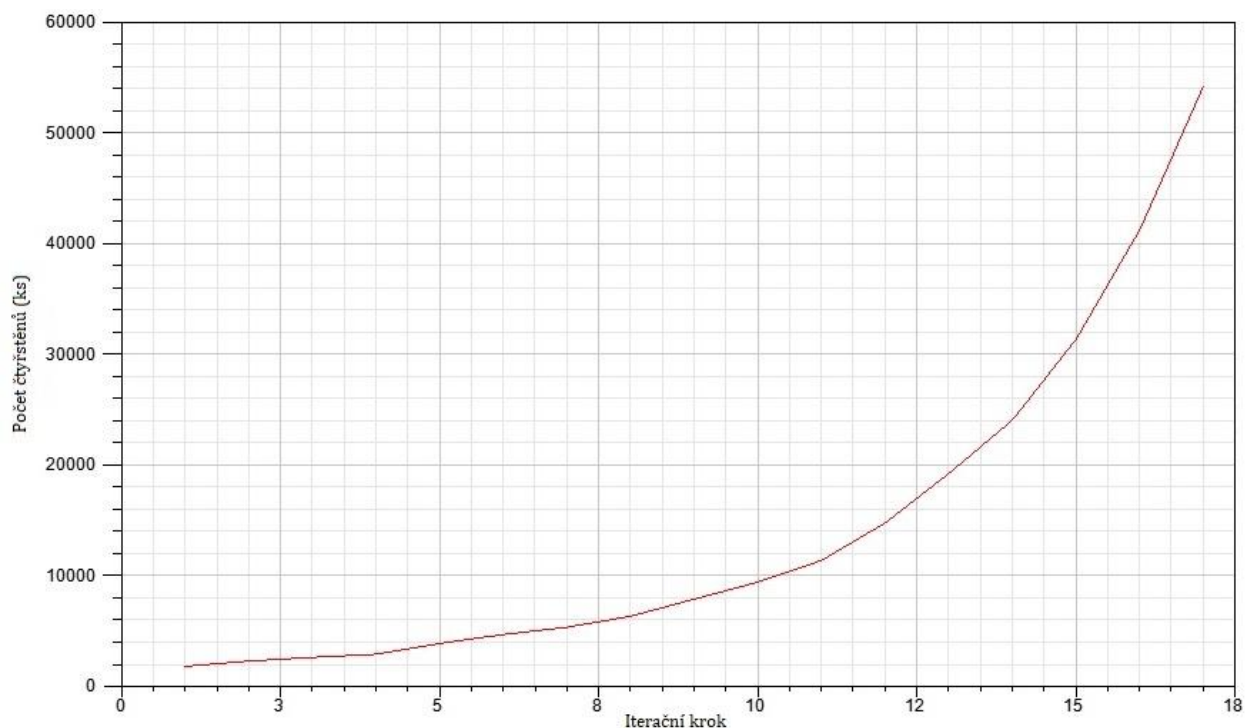
V následující tabulce jsou výsledky výpočtů pro jednotlivé iterační kroky, které jsou v podrobnostech provedené simulace.

Tabulka 12: Příklad výsledků simulace

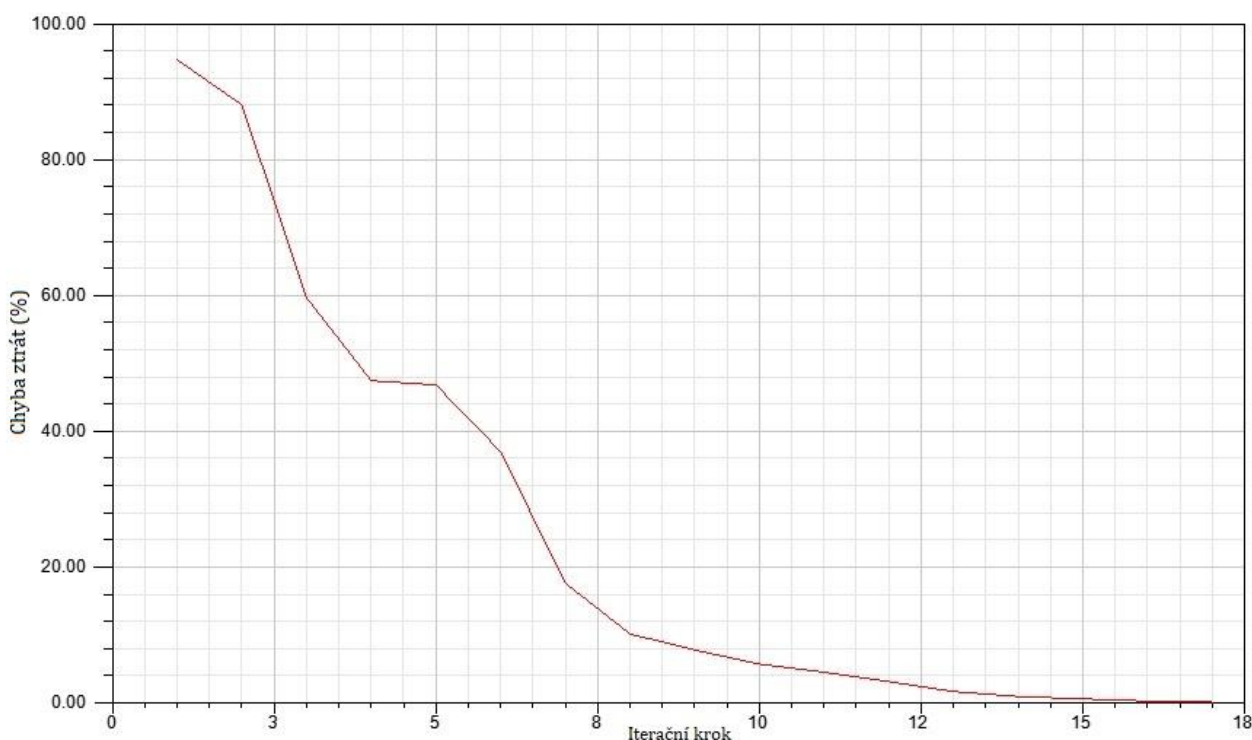
Iterace	Čtyřstěny (ks)	Ztráty (W)	Chyba ztrát (%)	Rozdíl ztrát (%)
1	1 872	8 956,1	94,698	–
2	2 354	9 083,3	88,065	1,4204
3	2 681	7 808,4	59,702	14,036
4	2 972	9 323,9	47,483	19,408
5	3 939	9 479,4	46,875	1,6678
6	4 748	8 859,7	37,018	6,5375
7	5 404	12 023	17,702	35,704
8	6 392	13 444	10,229	11,824
9	7 943	14 921	7,8726	10,983
10	9 478	17 410	5,7919	16,683
11	11 439	19 284	4,6102	10,759
12	14 820	21 379	3,2303	10,866
13	19 282	23 413	1,766	9,5123
14	24 109	24 645	1,0394	5,2652
15	31 417	25 303	0,68567	2,6701
16	41 293	25 610	0,36586	1,2111
17	54 257	25 723	0,20963	0,44139

8 Simulace dvouvrstvého modelu

Empiricky bylo zjištěno, že počítač, na kterém byly prováděny simulace, zvládne maximálně cca 500 000 čtyřstěnů. V tomto případě bylo tedy možno nastavit buď větší poloměr okolní půdy r (což již výsledky příliš nezlepší), nebo nižší procentní chybu výpočtu e , což by přineslo přesnější výsledky. Simulace se ukončí, teprve když v daném iteračním kroku klesne hodnota jak chyby ztrát, tak rozdílu ztrát pod nastavenou hodnotu e (zde 1 %) – viz tabulka 12. V podrobnostech simulace je možné nechat si tyto výsledky zobrazit i v grafické podobě – viz následující 3 obrázky.

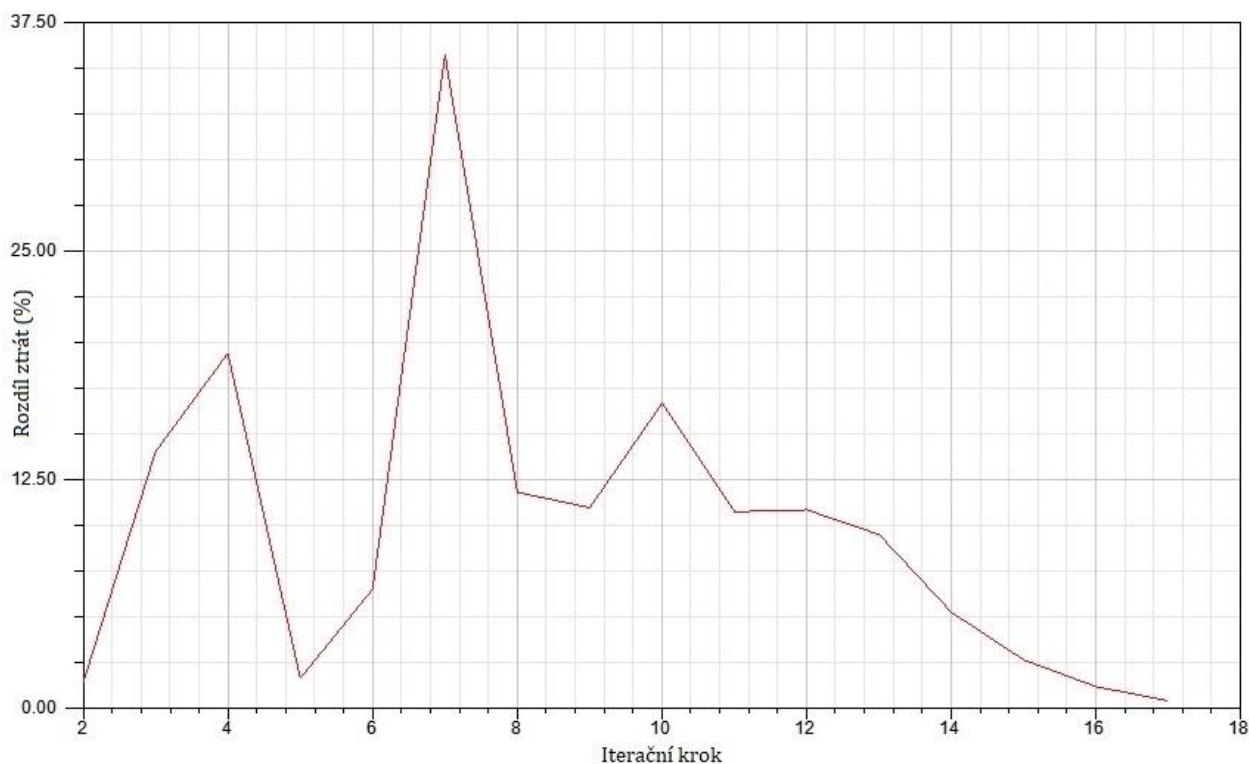


Obrázek 39: Počet čtyřstěnů v závislosti na iteračním kroku



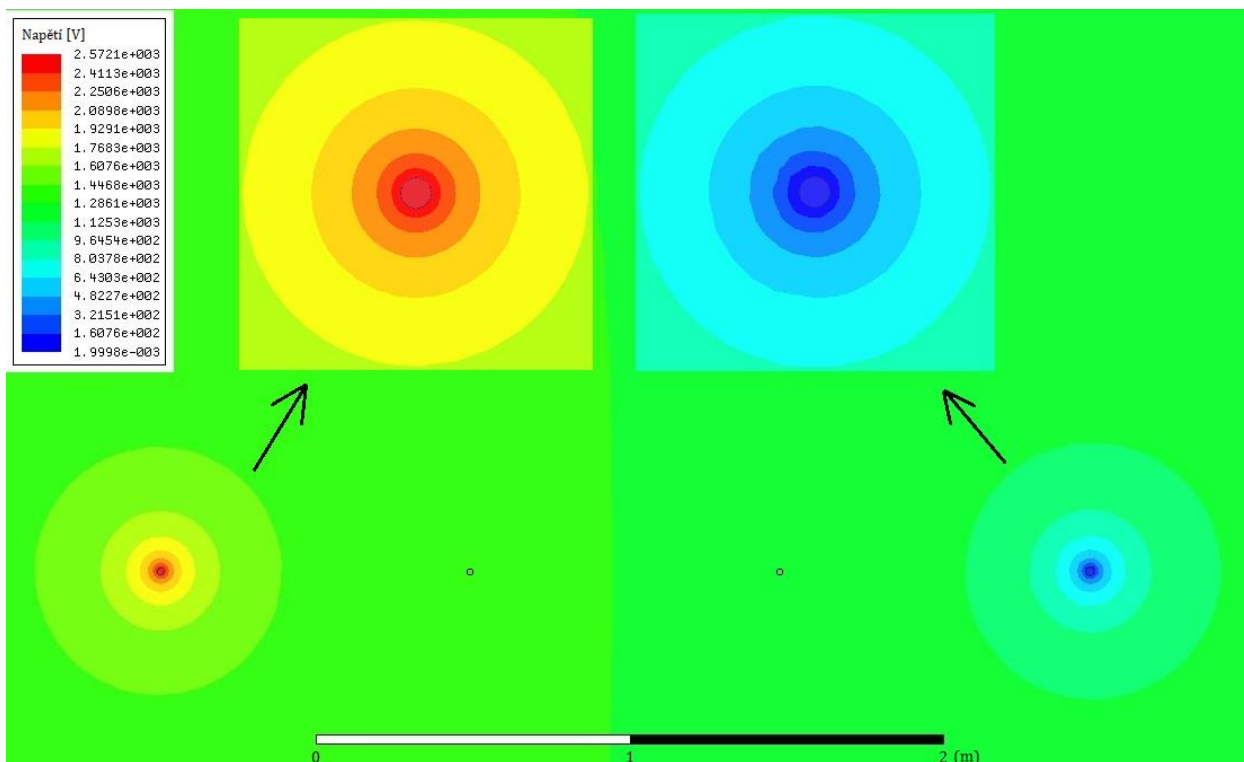
Obrázek 40: Chyba ztrát v závislosti na iteračním kroku

8 Simulace dvouvrstvého modelu



Obrázek 41: Rozdíl ztrát v závislosti na iteračním kroku

Další možností je zobrazení rozložení elektrického pole. K tomu je potřeba vybrat rovinu, ve které se má rozložení zobrazit. Na následujícím obrázku je rozložení elektrického pole kolem proudových elektrod v rovině XY.

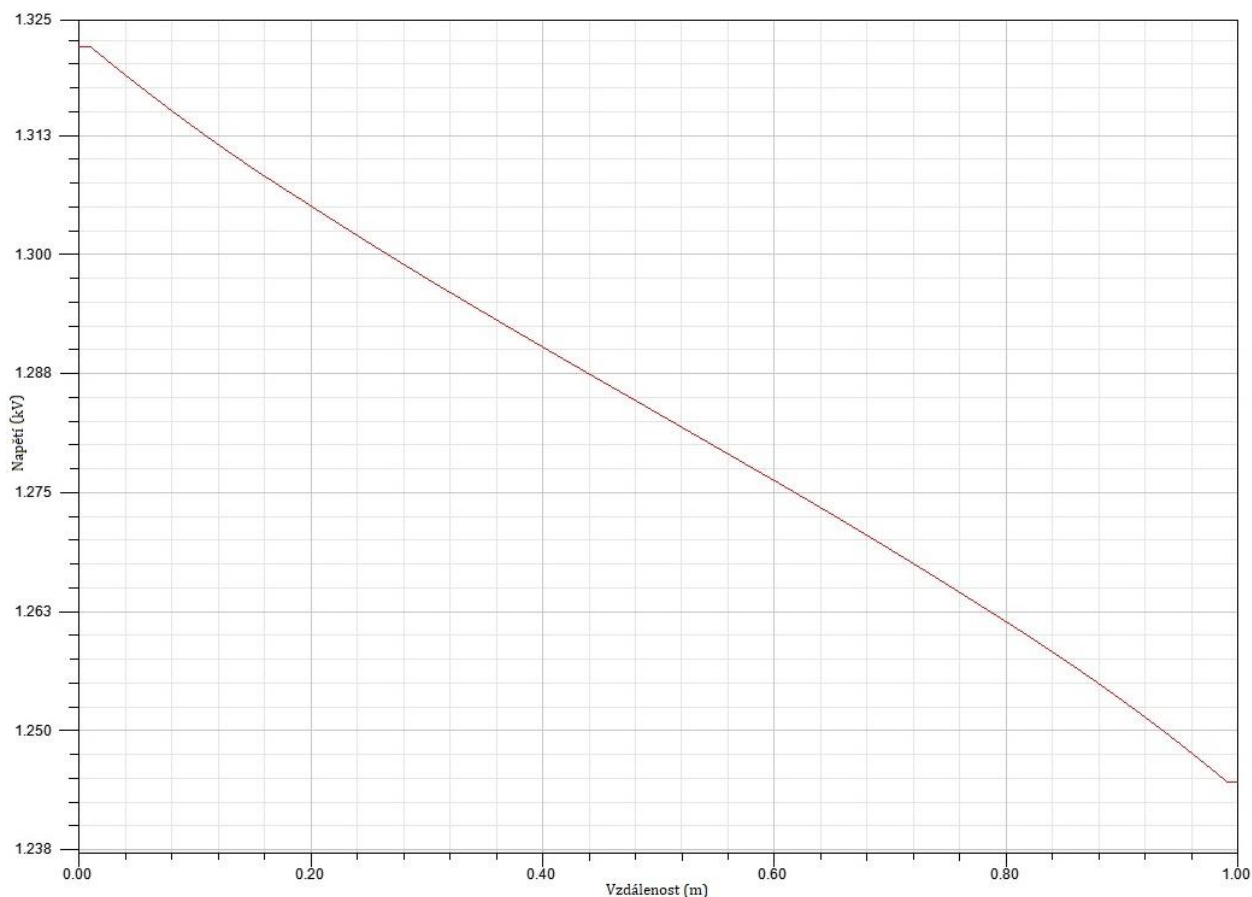


Obrázek 42: Rozložení elektrického pole kolem proudových elektrod

Z obrázku je patrné, že maximální gradient napětí je v místě, kde proud z elektrody 1 vstupuje do půdy a minimální tam, kde z půdy vystupuje do elektrody 4.

8 Simulace dvouvrstvého modelu

Program nabízí také možnost zobrazení rozložení napětí v grafu. Je tedy možné nechat zobrazit rozložení napětí mezi napětovými elektrodami. Nebude to již plošné rozložení, ale podél úsečky. Proto je potřeba mezi napětovými elektrodami nakreslit úsečku, podél níž se rozložení napětí následně nechá zobrazit (viz následující obrázek).



Obrázek 43: Rozložení napětí mezi napětovými elektrodami

Gradient napětí mezi proudovými elektrodami je minimální (lineární průběh), což potvrzuje teoretický předpoklad v [16].

9 VÝSLEDKY MĚŘENÍ A SIMULACÍ

V této kapitole jsou uvedeny výsledky měření provedených v rámci této práce. Měření byla uskutečněna ve třech různých lokalitách s různým složením půdy. U každého měření je uvedena poloha středu a směr měření, počasí v předchozích dnech i během měření a další informace. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulkách. Dále jsou zde zobrazeny výsledky z GUI určující dvouvrstvý model půdy, a nakonec výsledky simulací, z nichž jsou vypočteny hodnoty rezistivit, které jsou porovnány s naměřenými hodnotami.

9.1 Měření 1: Brno – Královo Pole

9.1.1 Poloha

První měření bylo provedeno na uměle vytvořeném náspu vedle Vědeckotechnického parku profesora Lista – Technická 14, FEKT VUT v Brně. Souřadnice středu měření jsou 49.228768N, 16.573201E. Střed (žlutý křížek) a směr měření (žlutá čára) jsou naznačeny na následujícím obrázku. Podle [18] se v této lokalitě vyskytuje půdní typ modální hnědozem.



Obrázek 44: Měření 1 – poloha [19]

9.1.2 Podmínky při měření

Měření se uskutečnilo 6. 4. 2018 v průběhu celého dne. Bylo slunečno, 14 °C ve stínu. Tomuto dni předcházelo období sucha trvající déle než 1 týden, s průměrnými teplotami okolo 15 °C, ale den před měřením krátce, ale silně pršelo. Na obrázku 44 je snímek ze 4. 4. 2016. Půda byla v době měření již pokryta krátkou trávou – viz následující obrázek.



Obrázek 45: Měření 1 – podmínky

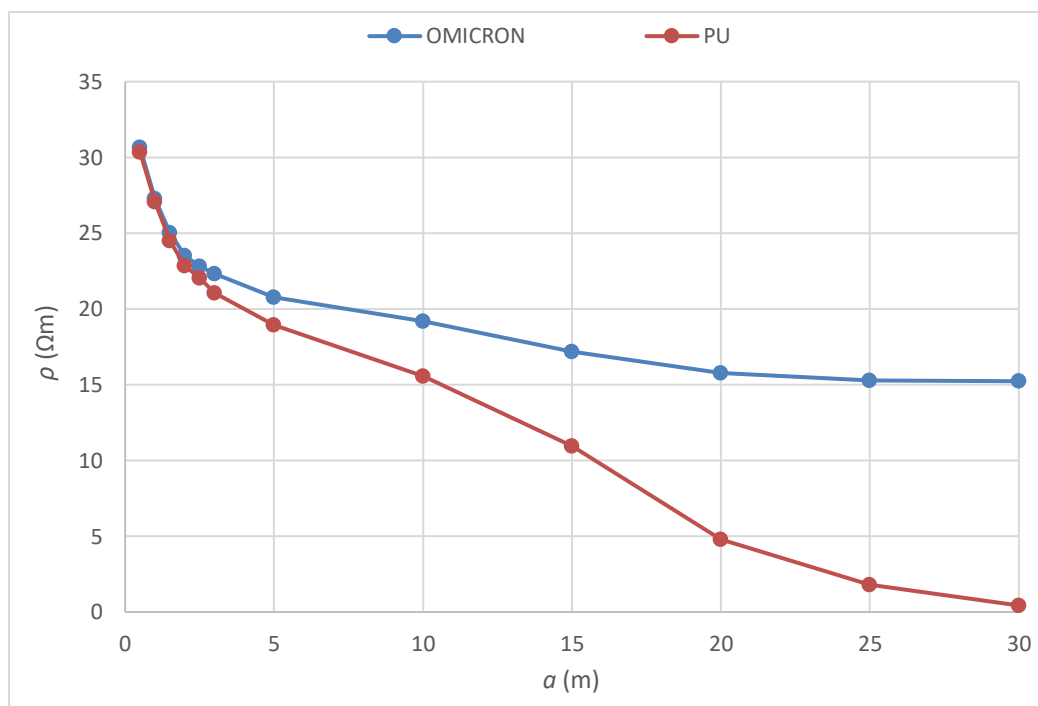
9.1.3 Naměřené hodnoty

Nejprve byly elektrody zatlučeny s rozstupem $a = 1$ m a hloubkou zaražení $b = 0,3$ m a provedlo se zkušební měření přístrojem OMICRON CPC 100, které ukázalo, že naměřené hodnoty jsou pro malé rozestupy proudově i frekvenčně nezávislé – viz tabulka 36 v příloze A. Poté již bylo provedeno měření pro všechny rozestupy při $b = 0,3$ m. Na přístroji OMICRON CPC 100 byl vždy nastaven proud 4 A a pro každý rozstup byly použity frekvence 128 a 378 Hz. U přístroje PU 193 není přesná hodnota proudu známa (max. 40 mA) a frekvence byla vždy 128 Hz. Následující tabulka obsahuje hodnoty, které byly použity k dalšímu zpracování (GUI a simulace). Ostatní naměřené hodnoty jsou v tabulce 35 v příloze A. Pro možnost srovnání hodnot naměřených oběma přístroji byly hodnoty odporů z OMICRONu přepočteny na rezistivity podle rovnice (3). V tabulce jsou rovněž uvedeny hodnoty rezistivit, které PU naměřilo – ρ_{PU} , a správných hodnot rezistivit ρ_{sp} vypočtených podle rovnice (17). S hodnotami ρ_{sp} je počítáno v GUI – viz obrázek 48.

Tabulka 13: Měření 1 – naměřené hodnoty a vypočtené rezistivity

$b = 0,3 \text{ m}$	$I = 4 \text{ A}$		$I = \text{max. } 40 \text{ mA}$	
	OMICRON CPC 100		PU 193	
$a \text{ (m)}$	$R \text{ (}\Omega\text{)}$	$\rho_{OM} \text{ (}\Omega\text{m)}$	$\rho_{PU} \text{ (}\Omega\text{m)}$	$\rho_{sp} \text{ (}\Omega\text{m)}$
0,5	6,94	30,65	21,6	30,36
1	3,82	27,29	23,8	27,09
1,5	2,49	25,04	23	24,52
2	1,80	23,53	22	22,84
2,5	1,42	22,81	21,5	22,03
3	1,16	22,34	20,7	21,06
5	0,66	20,77	18,83	18,95
10	0,30	19,19	15,54	15,56
15	0,18	17,17	10,93	10,94
20	0,13	15,78	4,78	4,78
25	0,10	15,29	1,81	1,81
30	0,081	15,23	0,43	0,43

Hodnoty ρ_{OM} se při malých rozestupech téměř shodují s hodnotami ρ_{sp} . Při zvětšujících se rozestupech se však od sebe čím dál více liší – viz obrázek 46.

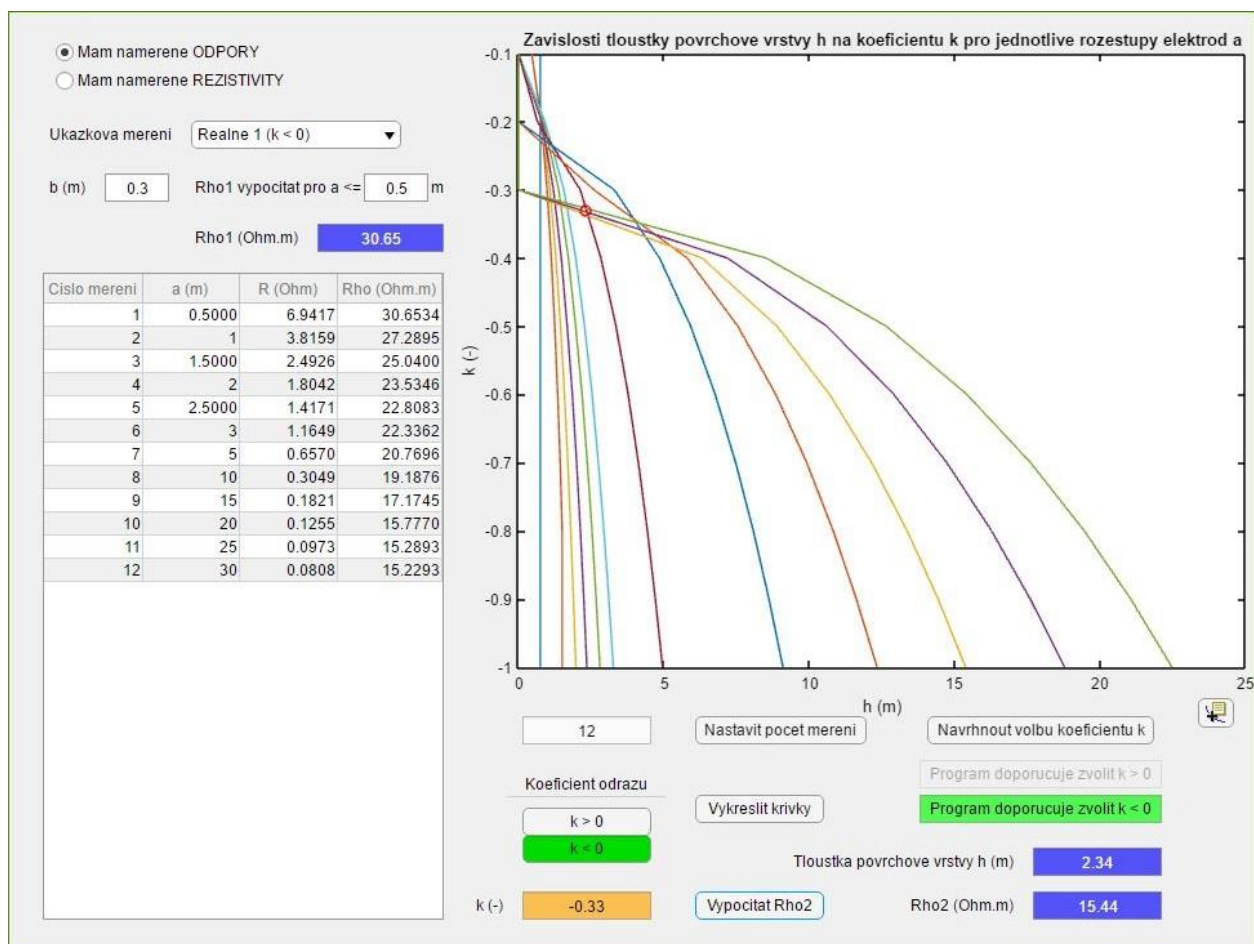


Obrázek 46: Měření 1 – naměřené hodnoty

9.1.4 GUI – dvouvrstvý model

Zde jsou zobrazeny hodnoty z GUI pro dvouvrstvý model a křivky, ze kterých byly určeny, a to jak z OMICRONu, tak z PU. V obrázcích jsou vždy ponechány souřadnice bodu, který program určil jako průsečík, a následně jsou v tabulce uvedeny hodnoty, které vychází z ručního určení průsečíku. V práci byly dále použity pouze hodnoty z ručně nalezených průsečíků.

9.1.4.1 OMICRON CPC 100



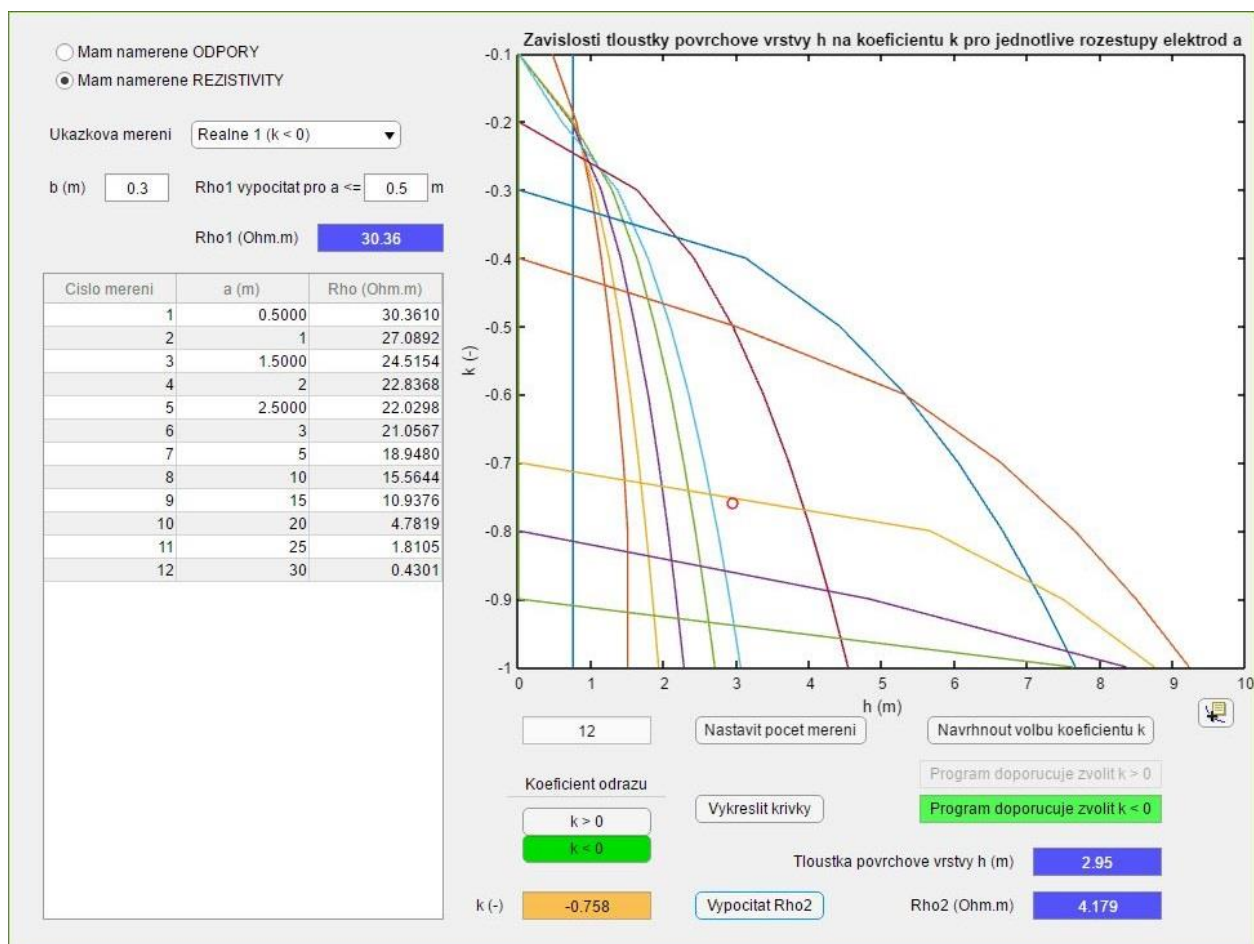
Obrázek 47: Měření 1 – OMICRON CPC 100 – GUI

Křivky na obrázku se protínaly na více místech, proto byla následná simulace provedena pro hodnoty všech průsečíků v následující tabulce.

Tabulka 14: Měření 1 – OMICRON CPC 100 – GUI

Průsečík	$Rho1$ (Ωm)	h (m)	k (-)	$Rho2$ (Ωm)
1	30,65	0,776	-0,23	20,57
2	30,65	2,36	-0,34	15,35
3	30,65	4,46	-0,36	14,25

9.1.4.2 PU 193



Obrázek 48: Měření 1 – PU 193 – GUI

V tomto případě bylo určeno, že se křivky protnuly pouze v jednom místě, viz následující tabulka.

Tabulka 15: Měření 1 – PU 193 – GUI

Průsečík	Rho1 (Ωm)	h (m)	k (-)	Rho2 (Ωm)
1	30,36	0,857	-0,23	18,86

9.1.5 Výsledky simulací

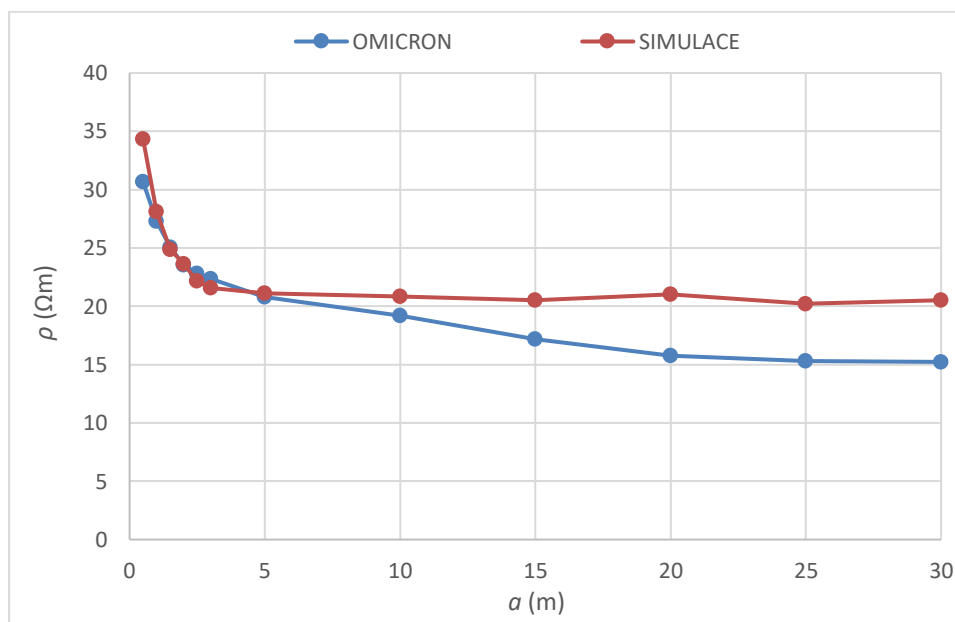
V následujících tabulkách jsou uvedeny výsledné hodnoty napětí ze simulací a z nich vypočtené hodnoty rezistivit, které jsou porovnány s naměřenými hodnotami (pro OMICRON jsou to hodnoty ρ_{OM} a pro PU ρ_{sp} , jež jsou také uvedeny v tabulkách).

9.1.5.1 OMICRON CPC 100

Průsečík 1

Tabulka 16: Měření 1 – výsledky simulací – OMICRON CPC 100 – průsečík 1

$\rho_1 = 30,65 \Omega\text{m}$		$h = 0,776 \text{ m}$		$\rho_2 = 20,57 \Omega\text{m}$		
$I = 4 \text{ A}$		$b = 0,3 \text{ m}$		$r = 250 \text{ m}$		$e = 1 \%$
$a \text{ (m)}$	0,5	1	1,5	2	2,5	3
$U \text{ (V)}$	31,09	15,72	9,89	7,24	5,51	4,50
$R \text{ (}\Omega\text{)}$	7,77	3,93	2,47	1,81	1,38	1,13
$\rho_{sim} \text{ (}\Omega\text{m)}$	34,32	28,10	24,84	23,61	22,17	21,59
$\rho_{OM} \text{ (}\Omega\text{m)}$	30,65	27,29	25,04	23,53	22,81	22,34
$a \text{ (m)}$	5	10	15	20	25	30
$U \text{ (V)}$	2,67	1,32	0,87	0,67	0,51	0,44
$R \text{ (}\Omega\text{)}$	0,67	0,33	0,22	0,17	0,13	0,11
$\rho_{sim} \text{ (}\Omega\text{m)}$	21,11	20,83	20,51	21,00	20,22	20,52
$\rho_{OM} \text{ (}\Omega\text{m)}$	20,77	19,19	17,17	15,78	15,29	15,23



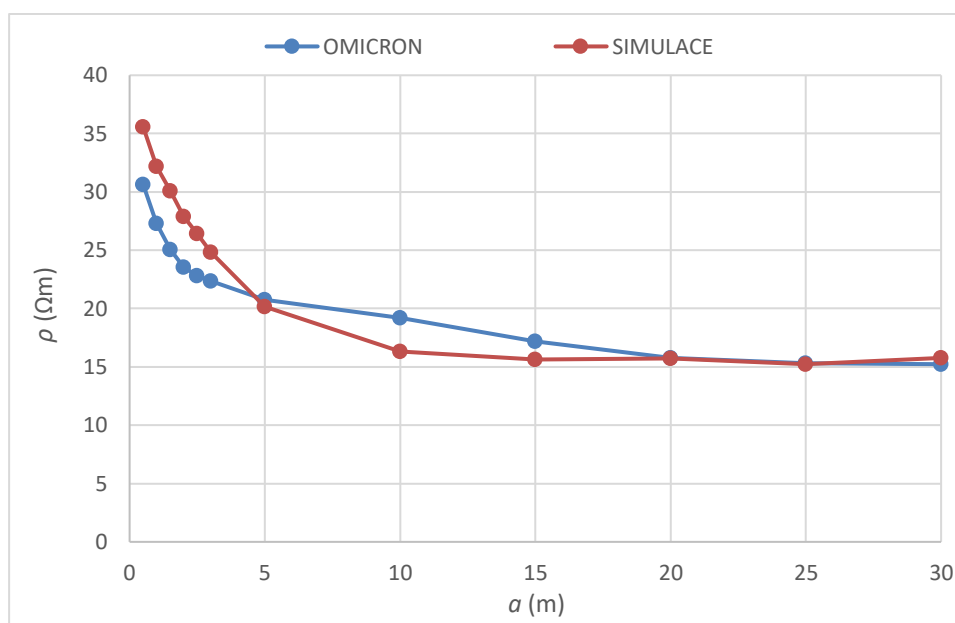
Obrázek 49: Měření 1 – výsledky simulací – OMICRON CPC 100 – průsečík 1

Hodnoty rezistivit ze simulací hodnot pro průsečík 1 se s naměřenými přibližně shodují pro rozestupy 1–10 m. Zbylé hodnoty se liší max. v řádech jednotek Ωm .

Průsečík 2

Tabulka 17: Měření 1 – výsledky simulací – OMICRON CPC 100 – průsečík 2

$\rho_1 = 30,65 \Omega\text{m}$		$h = 2,36 \text{ m}$		$\rho_2 = 15,35 \Omega\text{m}$		
$I = 4 \text{ A}$		$b = 0,3 \text{ m}$		$r = 250 \text{ m}$		$e = 1 \%$
$a \text{ (m)}$	0,5	1	1,5	2	2,5	3
$U \text{ (V)}$	32,24	18,01	11,97	8,54	6,56	5,18
$R \text{ (}\Omega\text{)}$	8,06	4,5	2,99	2,14	1,64	1,29
$\rho_{sim} \text{ (}\Omega\text{m)}$	35,59	32,2	30,06	27,87	26,41	24,83
$\rho_{OM} \text{ (}\Omega\text{m)}$	30,65	27,29	25,04	23,53	22,81	22,34
$a \text{ (m)}$	5	10	15	20	25	30
$U \text{ (V)}$	2,55	1,04	0,66	0,5	0,39	0,33
$R \text{ (}\Omega\text{)}$	0,64	0,26	0,17	0,12	0,1	0,084
$\rho_{sim} \text{ (}\Omega\text{m)}$	20,14	16,32	15,63	15,71	15,23	15,78
$\rho_{OM} \text{ (}\Omega\text{m)}$	20,77	19,19	17,17	15,78	15,29	15,23



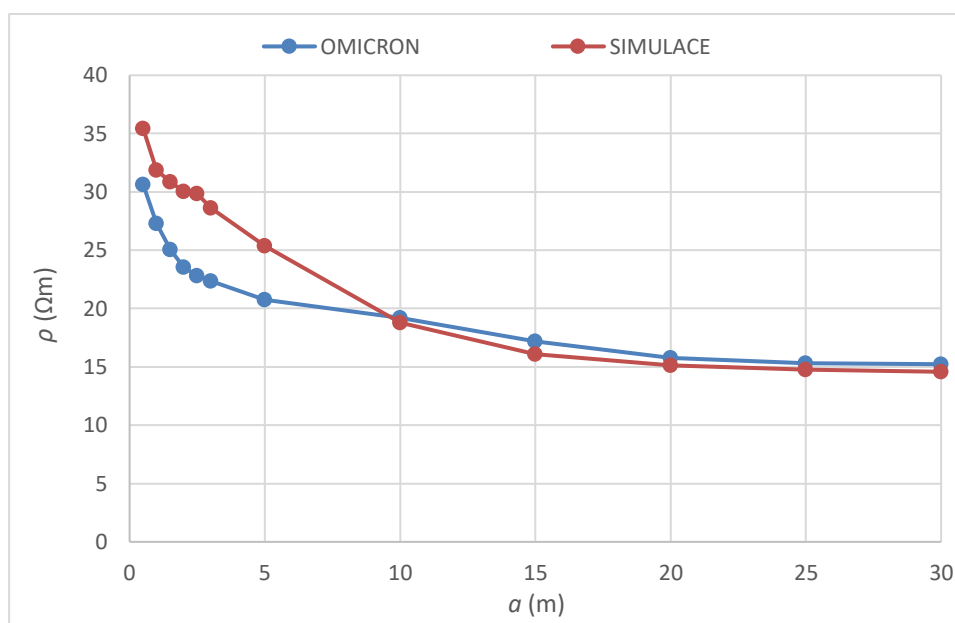
Obrázek 50: Měření 1 – výsledky simulací – OMICRON CPC 100 – průsečík 2

Pro hodnoty pro průsečík 2 se rezistivity přibližně shodují až pro větší rozestupy. Pro menší rozestupy se však neliší více než u průsečíku 1.

Průsečík 3

Tabulka 18: Měření 1 – výsledky simulací – OMICRON CPC 100 – průsečík 3

$\rho_1 = 30,65 \Omega\text{m}$		$h = 4,46 \text{ m}$		$\rho_2 = 14,25 \Omega\text{m}$		
$I = 4 \text{ A}$		$b = 0,3 \text{ m}$		$r = 250 \text{ m}$		$e = 1 \%$
$a \text{ (m)}$	0,5	1	1,5	2	2,5	3
$U \text{ (V)}$	32,1	17,81	12,29	9,21	7,42	5,97
$R \text{ (}\Omega\text{)}$	8,03	4,45	3,07	2,3	1,86	1,49
$\rho_{sim} \text{ (}\Omega\text{m)}$	35,44	31,85	30,85	30,04	29,87	28,61
$\rho_{OM} \text{ (}\Omega\text{m)}$	30,65	27,29	25,04	23,53	22,81	22,34
$a \text{ (m)}$	5	10	15	20	25	30
$U \text{ (V)}$	3,21	1,19	0,68	0,48	0,38	0,31
$R \text{ (}\Omega\text{)}$	0,8	0,3	0,17	0,12	0,094	0,077
$\rho_{sim} \text{ (}\Omega\text{m)}$	25,37	18,79	16,1	15,11	14,78	14,58
$\rho_{OM} \text{ (}\Omega\text{m)}$	20,77	19,19	17,17	15,78	15,29	15,23



Obrázek 51: Měření 1 – výsledky simulací – OMICRON CPC 100 – průsečík 3

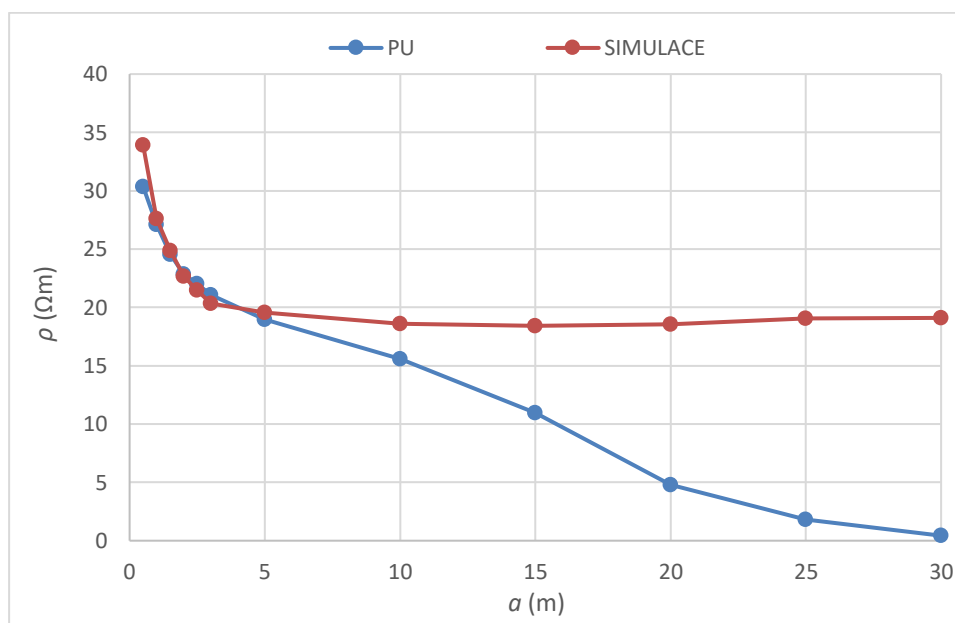
Zde je to velmi podobné jako u průsečíku 2. Pro vyšší rozestupy se však rezistivity liší o něco více.

Nejméně se tedy hodnoty vzájemně liší pro průsečík 2, který byl také nalezen funkcí pro hledání průsečíku v GUI (viz obrázek 47).

9.1.5.2 PU 193

Tabulka 19: Měření 1 – výsledky simulací – PU 193

$\rho_1 = 30,36 \Omega\text{m}$		$h = 0,857 \text{ m}$		$\rho_2 = 18,86 \Omega\text{m}$		
$I = 4 \text{ A}$		$b = 0,3 \text{ m}$		$r = 250 \text{ m}$		$e = 1 \%$
$a \text{ (m)}$	0,5	1	1,5	2	2,5	3
$U \text{ (V)}$	30,72	15,45	9,89	6,96	5,34	4,24
$R \text{ (}\Omega\text{)}$	7,68	3,86	2,47	1,74	1,33	1,06
$\rho_{sim} \text{ (}\Omega\text{m)}$	33,91	27,62	24,84	22,68	21,47	20,33
$\rho_{sp} \text{ (}\Omega\text{m)}$	30,36	27,09	24,52	22,84	22,03	21,06
$a \text{ (m)}$	5	10	15	20	25	30
$U \text{ (V)}$	2,47	1,18	0,78	0,59	0,48	0,41
$R \text{ (}\Omega\text{)}$	0,62	0,3	0,2	0,15	0,12	0,1
$\rho_{sim} \text{ (}\Omega\text{m)}$	19,54	18,61	18,42	18,57	19,04	19,12
$\rho_{sp} \text{ (}\Omega\text{m)}$	18,95	15,56	10,94	4,78	1,81	0,43



Obrázek 52: Měření 1 – výsledky simulací – PU 193

Zde se hodnoty přibližně shodují pro rozestupy do 5 m. Poté se s rostoucím rozestupem čím dál více liší.

9.2 Měření 2: Hrušovany nad Jevišovkou – Pravice

9.2.1 Poloha

Druhé měření bylo provedeno v průseku pod vedením velmi vysokého napětí (modré čáry), poblíž stožáru typu Sedlák (oranžová kružnice) mezi Hrušovany nad Jevišovkou a obcí Pravice. Souřadnice středu měření jsou, 48.841856N, 16.373271E. Střed (žlutý křížek) a směr měření (žlutá čára) jsou naznačeny na následujícím obrázku. Podle [18] se v této lokalitě vyskytuje půdní typ arenická kambizem. K příjezdu byla použita polní cesta vedoucí z Hrušovan nad Jevišovkou (na obrázku vpravo).



Obrázek 53: Měření 2 – poloha [19]

9.2.2 Podmínky při měření

Měření se uskutečnilo 12. 4. 2018 v průběhu celého dne. Bylo slunečno, 25 °C ve stínu. Tomuto dni předcházelo období sucha trvající déle než 1 týden, s průměrnými teplotami okolo 20 °C. Na obrázku 53 je snímek z 18. 5. 2017. Půda byla v době měření pokryta středně dlouhou trávou a místo měření zarostlé akáty – viz následující obrázek.



Obrázek 54: Měření 2 – podmínky

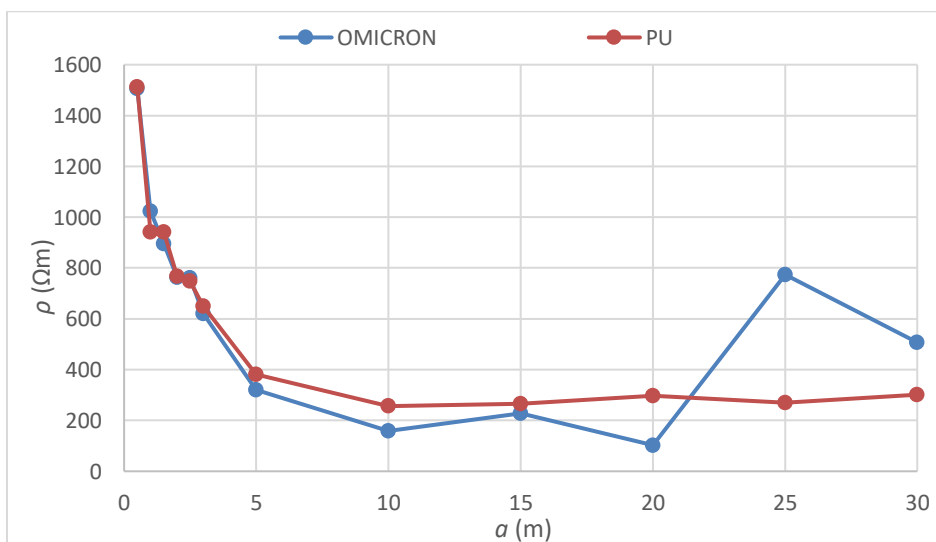
9.2.3 Naměřené hodnoty

Měření bylo provedeno pro všechny rozestupy při $b = 0,3$ m. Na přístroji OMICRON CPC 100 byl vždy nastaven proud 4 A a pro každý rozestup byly použity frekvence 128 a 378 Hz. U přístroje PU 193 není přesná hodnota proudu známa (max. 40 mA) a frekvence byla nastavena na 128 Hz. Při rozestupu 25 m byla OMICRONem provedena měření při různých frekvencích a byla zjištěna frekvenční závislost naměřených hodnot pro velké rozestupy – viz tabulka 38 v příloze B. Následující tabulka obsahuje hodnoty, které byly použity k dalšímu zpracování (GUI a simulace). Ostatní naměřené hodnoty jsou v tabulce 37 v příloze B. Pro možnost srovnání hodnot naměřených oběma přístroji byly hodnoty odporů z OMICRONu přepočteny na rezistivity podle rovnice (3). V tabulce jsou rovněž uvedeny hodnoty rezistivit, které PU naměřilo – ρ_{PU} , a správných hodnot rezistivit ρ_{sp} vypočtených podle rovnice (17). S hodnotami ρ_{sp} je počítáno v GUI – viz obrázek 56.

Tabulka 20: Měření 2 – naměřené hodnoty a vypočtené rezistivity

$b = 0,3$ m	$I = 4$ A		$I = \text{max. } 40$ mA	
	OMICRON CPC 100		PU 193	
a (m)	R (Ω)	ρ_{OM} (Ωm)	ρ_{PU} (Ωm)	ρ_{sp} (Ωm)
0,5	340,87	1505,23	1076	1512,43
1	143,16	1023,81	827	941,29
1,5	89,24	896,43	883	941,18
2	58,57	764,06	739	767,11
2,5	47,27	760,81	730	747,99
3	32,37	620,67	639	650,01
5	10,16	321,25	378	380,37
10	2,53	159,31	256	256,4
15	2,42	228,65	265	265,19
20	0,82	102,72	298	298,12
25	4,93	774,11	270	270,07
30	2,69	506,48	302	302,05

Hodnoty ρ_{OM} se při malých rozestupech téměř shodují s hodnotami ρ_{sp} . Při zvětšujících se rozestupech se však od sebe čím dál více liší – viz obrázek 55.

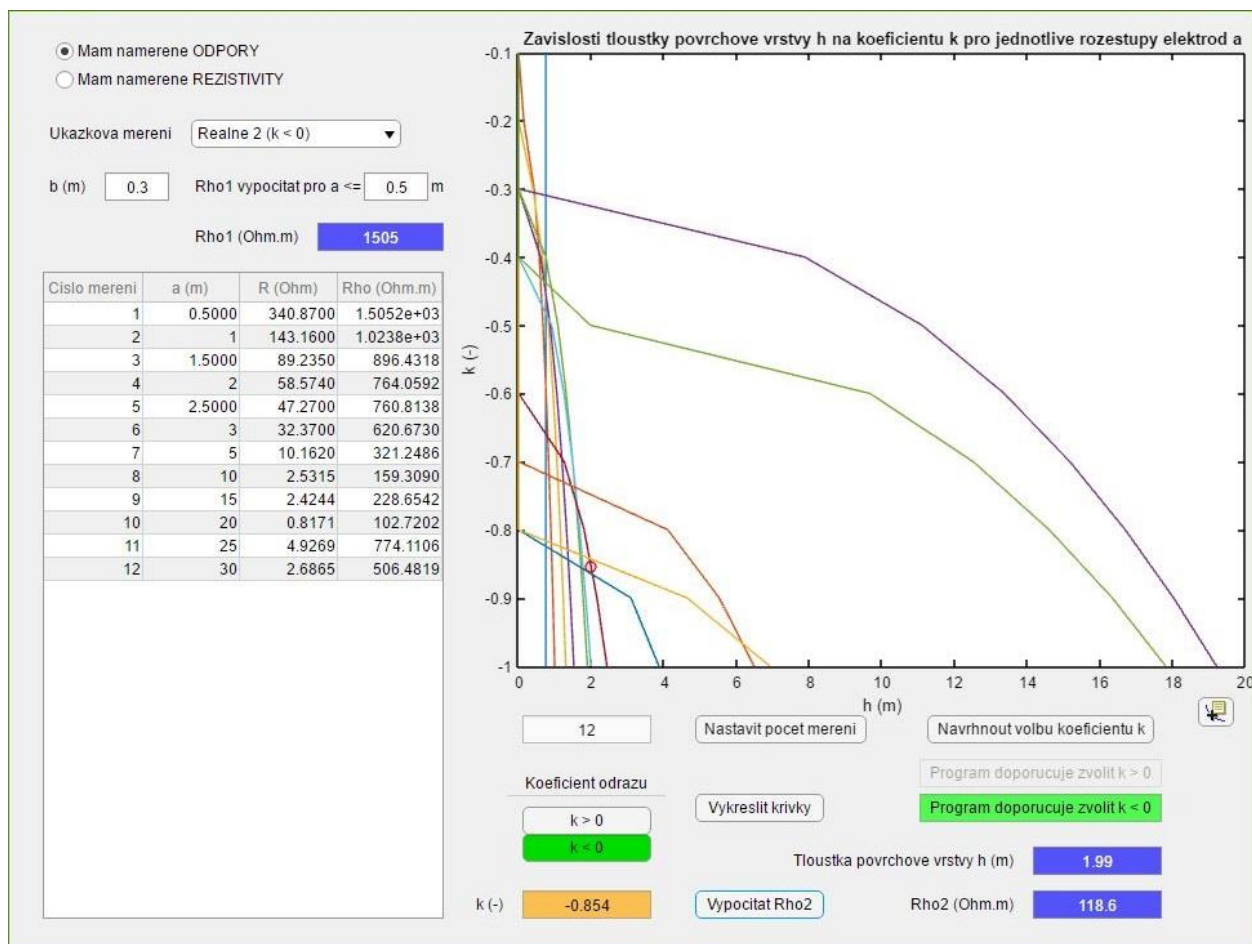


Obrázek 55: Měření 2 – naměřené hodnoty

9.2.4 GUI – dvouvrstvý model

Zde jsou zobrazeny hodnoty z GUI pro dvouvrstvý model a křivky, ze kterých byly určeny, a to jak z OMICRONu, tak z PU. V obrázcích jsou vždy ponechány souřadnice bodu, který program určil jako průsečík, a následně jsou v tabulce uvedeny hodnoty, které vychází z ručního určení průsečíku. V práci byly dále použity pouze hodnoty z ručně nalezených průsečíků.

9.2.4.1 OMICRON CPC 100



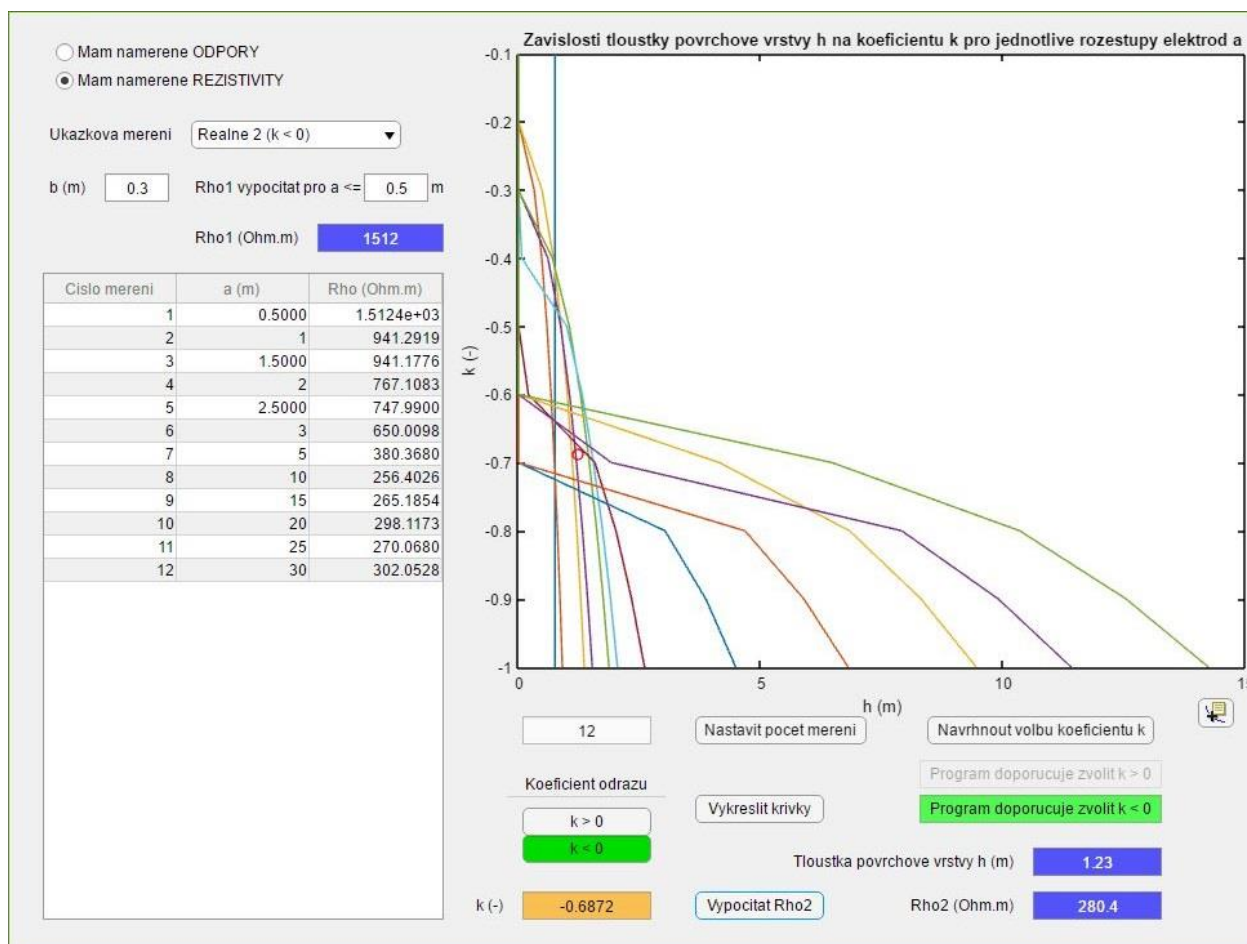
Obrázek 56: Měření 2 – OMICRON CPC 100 – GUI

Křivky na obrázku se protnuly na více místech, proto byla následná simulace provedena pro hodnoty průsečíků v následující tabulce.

Tabulka 21: Měření 2 – OMICRON CPC 100 – GUI

Průsečík	Rho1 (Ωm)	h (m)	k (-)	Rho2 (Ωm)
1	1505,2	0,6	-0,39	658
2	1505,2	1,76	-0,81	154,3

9.2.4.2 PU 193



Obrázek 57: Měření 2 – PU 193 – GUI

Křivky na obrázku se protínaly na více místech, proto byla následná simulace provedena pro hodnoty všech průsečíků v následující tabulce.

Tabulka 22: Měření 2 – PU 193 – GUI

Průsečík	<i>Rho1</i> (Ωm)	<i>h</i> (m)	<i>k</i> (-)	<i>Rho2</i> (Ωm)
1	1512,4	0,657	-0,42	611
2	1512,4	1,08	-0,64	332,8
3	1512,4	1,65	-0,75	220

9.2.5 Výsledky simulací

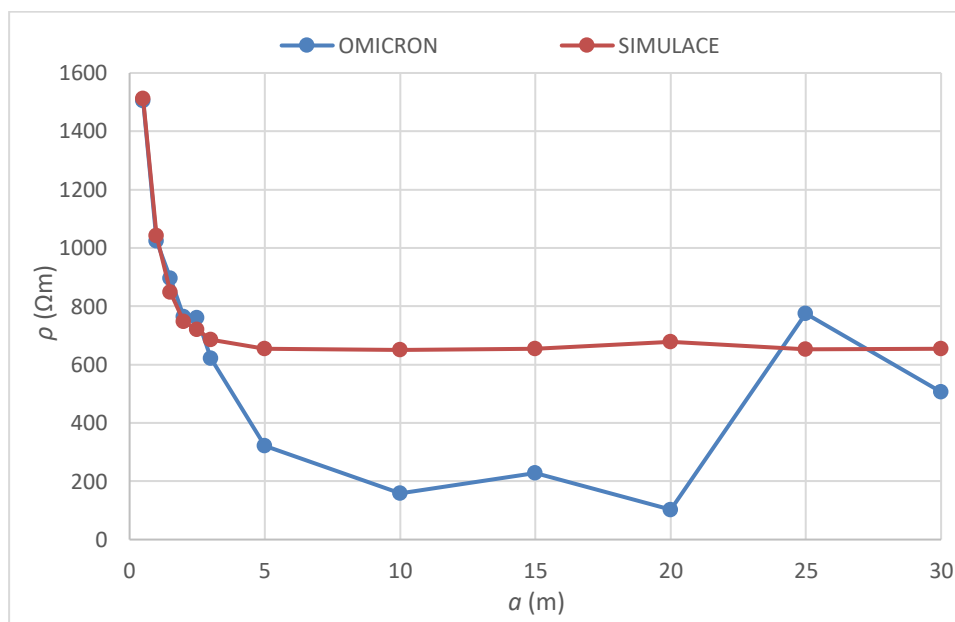
V následujících tabulkách jsou uvedeny výsledné hodnoty napětí ze simulací a z nich vypočtené hodnoty rezistivit, které jsou porovnány s naměřenými hodnotami (pro OMICRON jsou to hodnoty ρ_{OM} a pro PU ρ_{sp} , jež jsou také uvedeny v tabulkách).

9.2.5.1 OMICRON CPC 100

Průsečík 1

Tabulka 23: Měření 2 – výsledky simulací – OMICRON CPC 100 – průsečík 1

$\rho_1 = 1505,2 \Omega\text{m}$		$h = 0,6 \text{ m}$		$\rho_2 = 658 \Omega\text{m}$		
$I = 4 \text{ A}$		$b = 0,3 \text{ m}$		$r = 250 \text{ m}$		$e = 1 \%$
$a \text{ (m)}$	0,5	1	1,5	2	2,5	3
$U \text{ (V)}$	1369,5	582,45	337,52	229,42	179,1	142,9
$R \text{ (}\Omega\text{)}$	342,37	145,61	84,38	57,36	44,78	35,72
$\rho_{sim} \text{ (}\Omega\text{m)}$	1511,87	1041,35	847,66	748,16	720,66	684,98
$\rho_{OM} \text{ (}\Omega\text{m)}$	1505,2	1023,8	896,43	764,06	760,81	620,67
$a \text{ (m)}$	5	10	15	20	25	30
$U \text{ (V)}$	82,69	41,33	27,76	21,56	16,59	13,89
$R \text{ (}\Omega\text{)}$	20,67	10,33	6,94	5,39	4,15	3,47
$\rho_{sim} \text{ (}\Omega\text{m)}$	653,5	650,28	654,63	677,53	651,69	654,81
$\rho_{OM} \text{ (}\Omega\text{m)}$	321,25	159,31	228,65	102,72	774,11	506,48



Obrázek 58: Měření 2 – výsledky simulací – OMICRON CPC 100 – průsečík 1

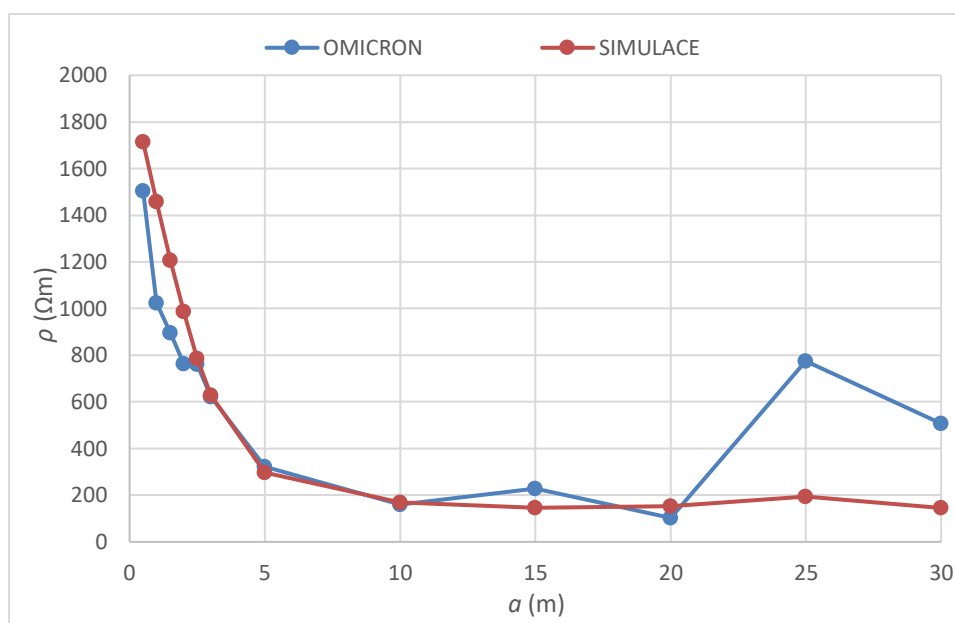
Hodnoty rezistivit ze simulací hodnot pro průsečík 1 se s naměřenými přibližně shodují pro malé rozestupy. Pro velké rozestupy se výrazně liší.

9 Výsledky měření a simulací

Průsečík 2

Tabulka 24: Měření 2 – výsledky simulací – OMICRON CPC 100 – průsečík 2

$\rho_1 = 1505,2 \Omega\text{m}$		$h = 1,76 \text{ m}$		$\rho_2 = 154,3 \Omega\text{m}$		
$I = 4 \text{ A}$		$b = 0,3 \text{ m}$		$r = 250 \text{ m}$		$e = 1 \%$
$a \text{ (m)}$	0,5	1	1,5	2	2,5	3
$U \text{ (V)}$	1552,9	815,78	480,43	302,64	195,52	130,96
$R \text{ (}\Omega\text{)}$	388,23	203,95	120,11	75,66	48,88	32,74
$\rho_{sim} \text{ (}\Omega\text{m)}$	1714,34	1458,52	1206,58	986,92	786,73	627,78
$\rho_{OM} \text{ (}\Omega\text{m)}$	1505,2	1023,8	896,43	764,06	760,81	620,67
$a \text{ (m)}$	5	10	15	20	25	30
$U \text{ (V)}$	37,71	10,78	6,22	4,83	4,94	3,08
$R \text{ (}\Omega\text{)}$	9,43	2,69	1,56	1,21	1,23	0,77
$\rho_{sim} \text{ (}\Omega\text{m)}$	298,05	169,57	146,73	151,8	193,96	145,26
$\rho_{OM} \text{ (}\Omega\text{m)}$	321,25	159,31	228,65	102,72	774,11	506,48



Obrázek 59: Měření 2 – výsledky simulací – OMICRON CPC 100 – průsečík 2

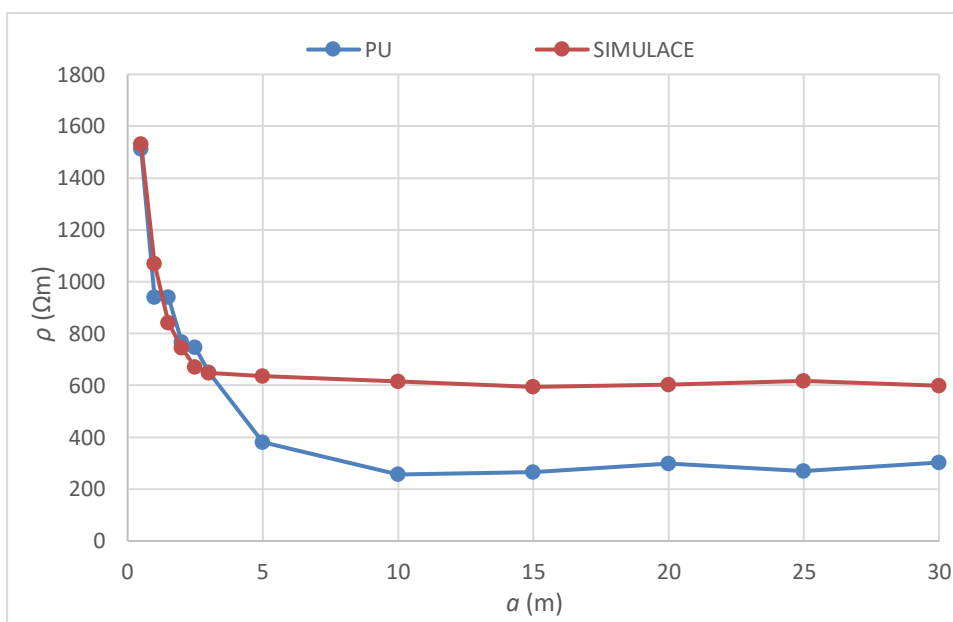
Pro hodnoty pro průsečík 2 se rezistivity přibližně shodují pro rozestupy 2,5–10 m. Pro zbylé rozestupy se výrazně liší.

9.2.5.2 PU 193

Průsečík 1

Tabulka 25: Měření 2 – výsledky simulací – PU 193 – průsečík 1

$\rho_1 = 1512,4 \Omega\text{m}$		$h = 0,657 \text{ m}$		$\rho_2 = 611 \Omega\text{m}$		
$I = 4 \text{ A}$		$b = 0,3 \text{ m}$		$r = 250 \text{ m}$		$e = 1 \%$
$a \text{ (m)}$	0,5	1	1,5	2	2,5	3
$U \text{ (V)}$	1387,68	598,99	335,4	228,6	166,66	135,31
$R \text{ (}\Omega\text{)}$	346,92	149,75	83,85	57,15	41,67	33,83
$\rho_{sim} \text{ (}\Omega\text{m)}$	1531,94	1070,92	842,35	745,49	670,6	648,62
$\rho_{sp} \text{ (}\Omega\text{m)}$	1512,4	941,29	941,18	767,11	747,99	650,01
$a \text{ (m)}$	5	10	15	20	25	30
$U \text{ (V)}$	80,36	39,1	25,21	19,2	15,71	12,73
$R \text{ (}\Omega\text{)}$	20,09	9,78	6,3	4,8	3,93	3,18
$\rho_{sim} \text{ (}\Omega\text{m)}$	635,14	615,21	594,41	603,33	617,01	599,94
$\rho_{sp} \text{ (}\Omega\text{m)}$	380,37	256,4	265,19	298,12	270,07	302,05



Obrázek 60: Měření 2 – výsledky simulací – PU 193 – průsečík 1

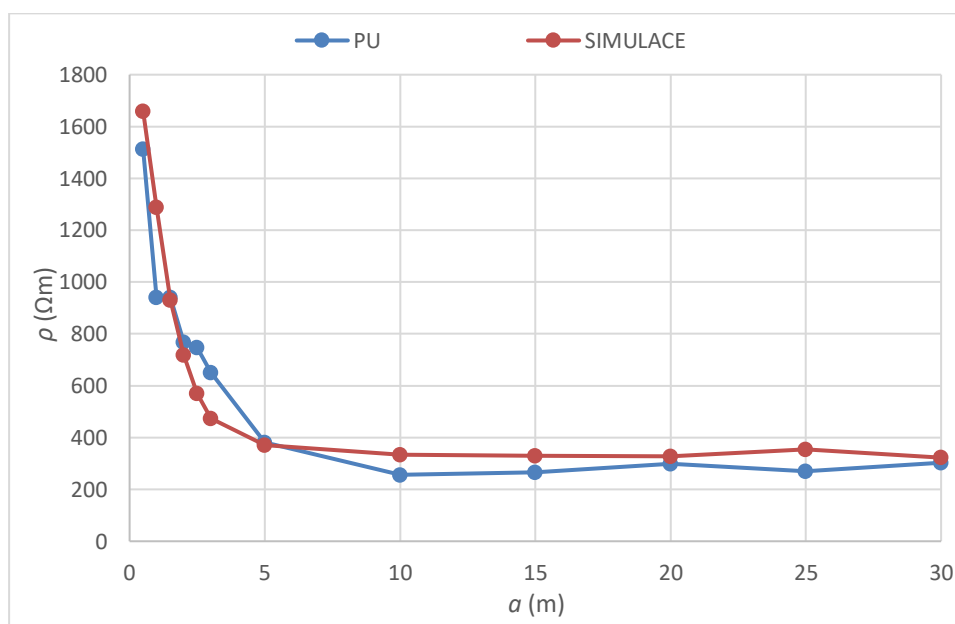
Zde se hodnoty přibližně shodují pro malé rozestupy. Pro velké rozestupy se výrazně liší.

9 Výsledky měření a simulací

Průsečík 2

Tabulka 26: Měření 2 – výsledky simulací – PU 193 – průsečík 2

$\rho_1 = 1512,4 \Omega\text{m}$		$h = 1,08 \text{ m}$		$\rho_2 = 332,8 \Omega\text{m}$		
$I = 4 \text{ A}$		$b = 0,3 \text{ m}$		$r = 250 \text{ m}$		$e = 1 \%$
$a \text{ (m)}$	0,5	1	1,5	2	2,5	3
$U \text{ (V)}$	1503,18	721,07	370,93	220,47	141,99	99,01
$R \text{ (}\Omega\text{)}$	375,79	180,27	92,73	55,12	35,5	24,75
$\rho_{sim} \text{ (}\Omega\text{m)}$	1659,45	1289,18	931,57	718,98	571,34	474,6
$\rho_{sp} \text{ (}\Omega\text{m)}$	1512,4	941,29	941,18	767,11	747,99	650,01
$a \text{ (m)}$	5	10	15	20	25	30
$U \text{ (V)}$	46,93	21,22	14,01	10,43	9	6,84
$R \text{ (}\Omega\text{)}$	11,73	5,31	3,5	2,61	2,25	1,71
$\rho_{sim} \text{ (}\Omega\text{m)}$	370,89	333,88	330,43	327,86	353,71	322,57
$\rho_{sp} \text{ (}\Omega\text{m)}$	380,37	256,4	265,19	298,12	270,07	302,05



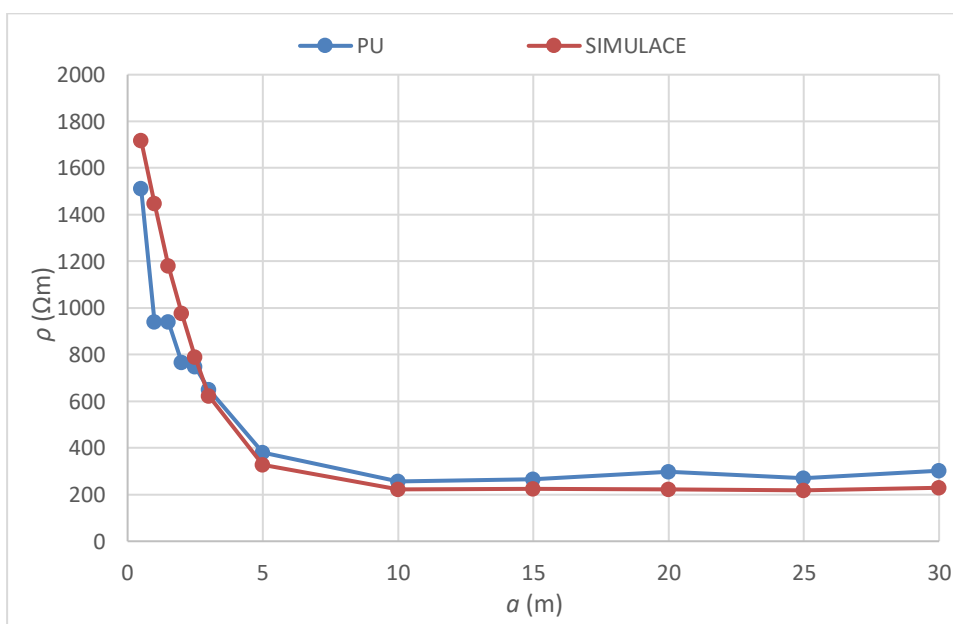
Obrázek 61: Měření 2 – výsledky simulací – PU 193 – průsečík 2

U tohoto průsečíku se rezistivity přibližně shodují hlavně pro velké rozestupy.

Průsečík 3

Tabulka 27: Měření 2 – výsledky simulací – PU 193 – průsečík 3

$\rho_1 = 1512,4 \Omega\text{m}$		$h = 1,65 \text{ m}$		$\rho_2 = 220 \Omega\text{m}$		
$I = 4 \text{ A}$		$b = 0,3 \text{ m}$		$r = 250 \text{ m}$	$e = 1 \%$	
$a \text{ (m)}$	0,5	1	1,5	2	2,5	3
$U \text{ (V)}$	1556,48	810,09	469,81	299,34	196,2	129,78
$R \text{ (}\Omega\text{)}$	389,12	202,52	117,45	74,84	49,05	32,44
$\rho_{sim} \text{ (}\Omega\text{m)}$	1718,29	1448,35	1179,9	976,18	789,48	622,1
$\rho_{sp} \text{ (}\Omega\text{m)}$	1512,4	941,29	941,18	767,11	747,99	650,01
$a \text{ (m)}$	5	10	15	20	25	30
$U \text{ (V)}$	41,54	14,12	9,54	7,05	5,56	4,86
$R \text{ (}\Omega\text{)}$	10,39	3,53	2,39	1,76	1,39	1,21
$\rho_{sim} \text{ (}\Omega\text{m)}$	328,31	222,13	225,01	221,7	218,2	228,97
$\rho_{sp} \text{ (}\Omega\text{m)}$	380,37	256,4	265,19	298,12	270,07	302,05



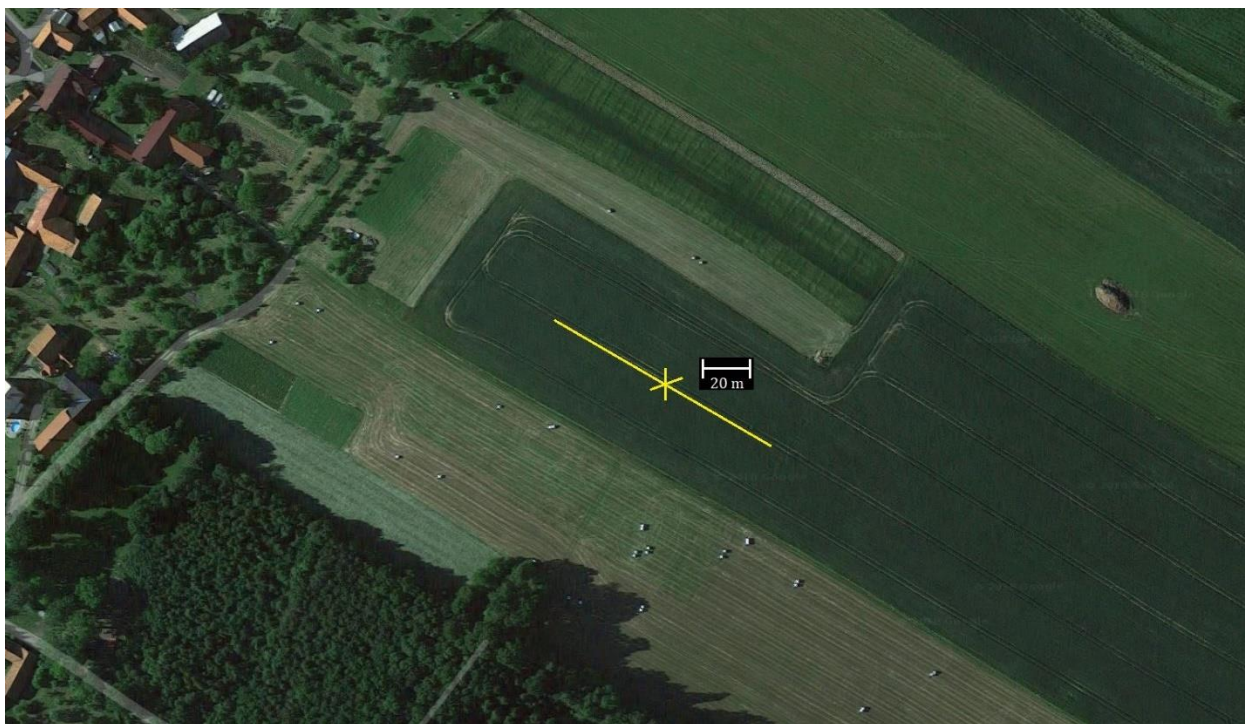
Obrázek 62: Měření 2 – výsledky simulací – PU 193 – průsečík 3

Zde je to podobné jako u průsečíku 2, protože se průsečíky nacházejí blízko sebe. Zde je však větší rozptyl rezistivit ze simulace.

9.3 Měření 3: Hustopeče nad Bečvou – Vysoká

9.3.1 Poloha

Třetí měření bylo provedeno na soukromém poli (se souhlasem majitele) na okraji obce Vysoká, poblíž Hustopečí na Bečvou. Souřadnice středu měření jsou, 49.552628N, 17.886061E. Střed (žlutý křížek) a směr měření (žlutá čára) jsou naznačeny na následujícím obrázku. Střed měření se nachází na horizontu pole. Podle [18] se v této lokalitě vyskytuje půdní typ oglejená kambizem.



Obrázek 63: Měření 3 – poloha [19]

9.3.2 Podmínky při měření

Měření se uskutečnilo 14. 4. 2018 v průběhu celého dne. Bylo slunečno, 18 °C ve stínu. Tomuto dni předcházely slunečné dny, s průměrnými teplotami okolo 18 °C. 4 dny před měřením v oblasti pršelo a den před měřením byla bouřka s hustým deštěm. Na obrázku 63 je snímek z 6. 6. 2015. Půda byla v době měření zoraná s čerstvou sadbou a na povrchu suchá – viz následující obrázek.



Obrázek 64: Měření 3 – podmínky

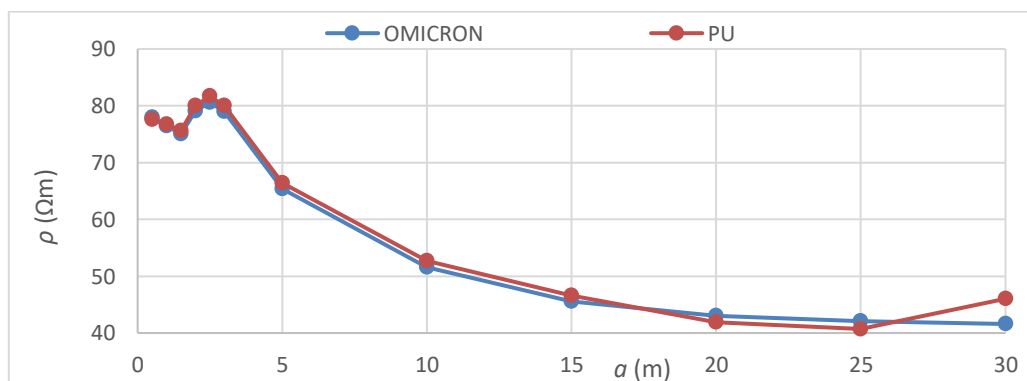
9.3.3 Naměřené hodnoty

Měření bylo provedeno pro všechny rozestupy při $b = 0,3$ m. Na přístroji OMICRON CPC 100 byl vždy nastaven proud 4 A a pro každý rozestup byly použity frekvence 128 a 378 Hz. U přístroje PU 193 není přesná hodnota proudu známa (max. 40 mA) a frekvence byla nastavena na 128 Hz. Při každém rozestupu byla oběma přístroji provedena měření při různých frekvencích a byla zjištěna frekvenční nezávislost naměřených hodnot u obou přístrojů pro rozestupy 0,5–5 m. Pro rozestupy 10 a 15 m u OMICRONu rezistivita od 128 do 178 Hz lineárně roste s frekvencí a pro 20–30 m je konstantní, ale úhel impedance lineárně roste s frekvencí. Příklad měření pro rozestup 30 m je v tabulce 40 v příloze C. U PU byla rezistivita pro všechny rozestupy frekvenčně nezávislá. Následující tabulka obsahuje hodnoty, které byly použity k dalšímu zpracování (GUI a simulace). Ostatní naměřené hodnoty jsou v tabulce 39 v příloze C. Pro možnost srovnání hodnot naměřených oběma přístroji byly hodnoty odporů z OMICRONu přepočteny na rezistivity podle rovnice (3). V tabulce jsou rovněž uvedeny hodnoty rezistivit, které PU naměřilo – ρ_{PU} , a správných hodnot rezistivit ρ_{sp} vypočtených podle rovnice (17). S hodnotami ρ_{sp} je počítáno v GUI – viz obrázek 66.

Tabulka 28: Měření 3 – naměřené hodnoty a vypočtené rezistivity

$b = 0,3$ m	$I = 4$ A		$I = \text{max. } 40$ mA	
	OMICRON CPC 100		PU 193	
a (m)	R (Ω)	ρ_{OM} (Ωm)	ρ_{PU} (Ωm)	ρ_{sp} (Ωm)
0,5	17,65	77,95	55,2	77,59
1	10,69	76,44	67,4	76,71
1,5	7,47	74,99	70,9	75,57
2	6,06	79,11	77,1	80,03
2,5	5,01	80,61	79,7	81,66
3	4,12	78,99	78,7	80,06
5	2,07	65,41	66	66,41
10	0,82	51,59	52,6	52,68
15	0,48	45,58	46,6	46,63
20	0,34	42,98	41,9	41,92
25	0,27	42,05	40,7	40,71
30	0,22	41,59	46	46,01

Hodnoty ρ_{OM} se téměř shodují s hodnotami ρ_{sp} při všech rozestupech kromě 30 m – viz obrázek 65.

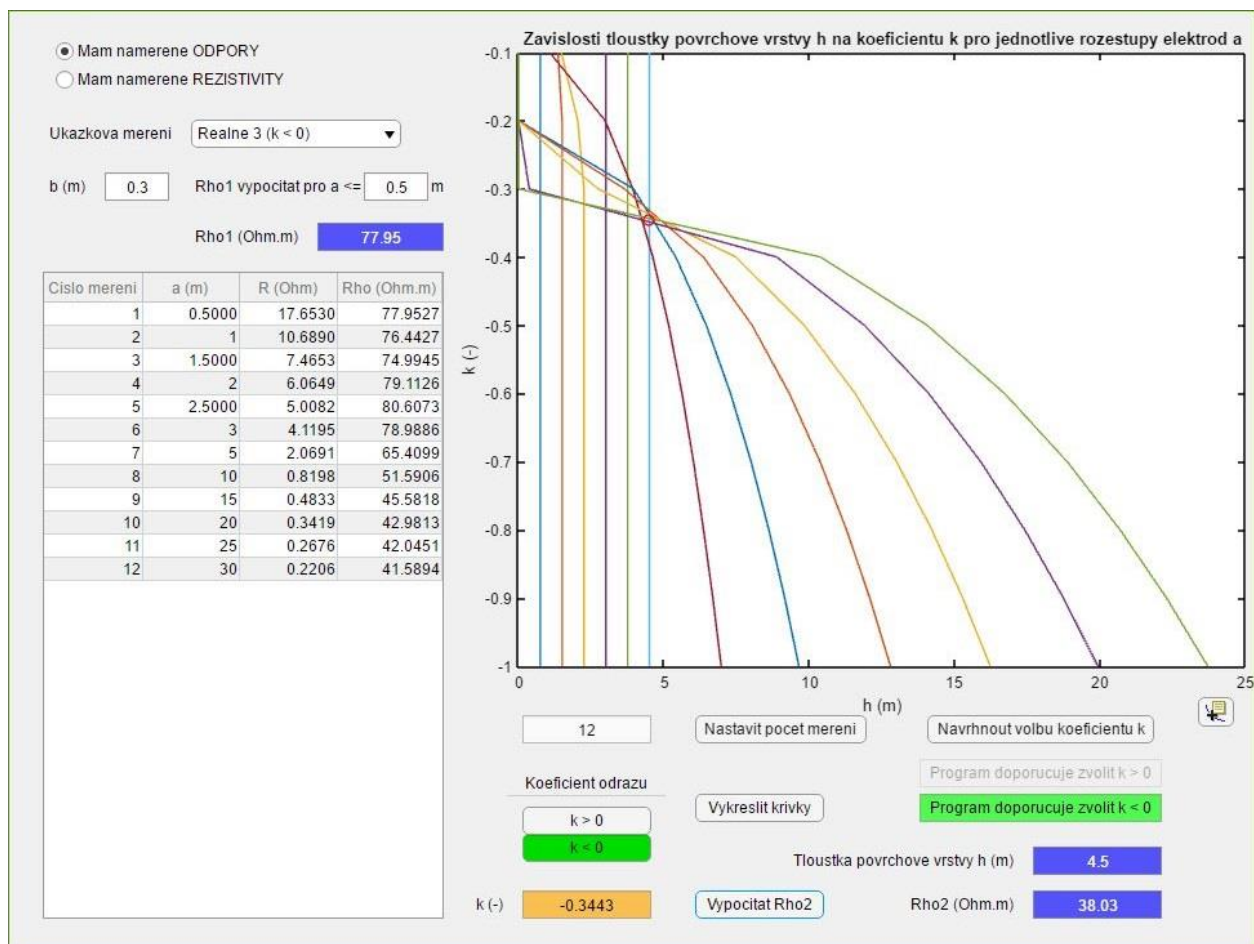


Obrázek 65: Měření 3 – naměřené hodnoty

9.3.4 GUI – dvouvrstvý model

Zde jsou zobrazeny hodnoty z GUI pro dvouvrstvý model a křivky, ze kterých byly určeny, a to jak z OMICRONu, tak z PU. V obrázcích jsou vždy ponechány souřadnice bodu, který program určil jako průsečík, a následně jsou v tabulce uvedeny hodnoty, které vychází z ručního určení průsečíku. V práci byly dále použity pouze hodnoty z ručně nalezených průsečíků.

9.3.4.1 OMICRON CPC 100



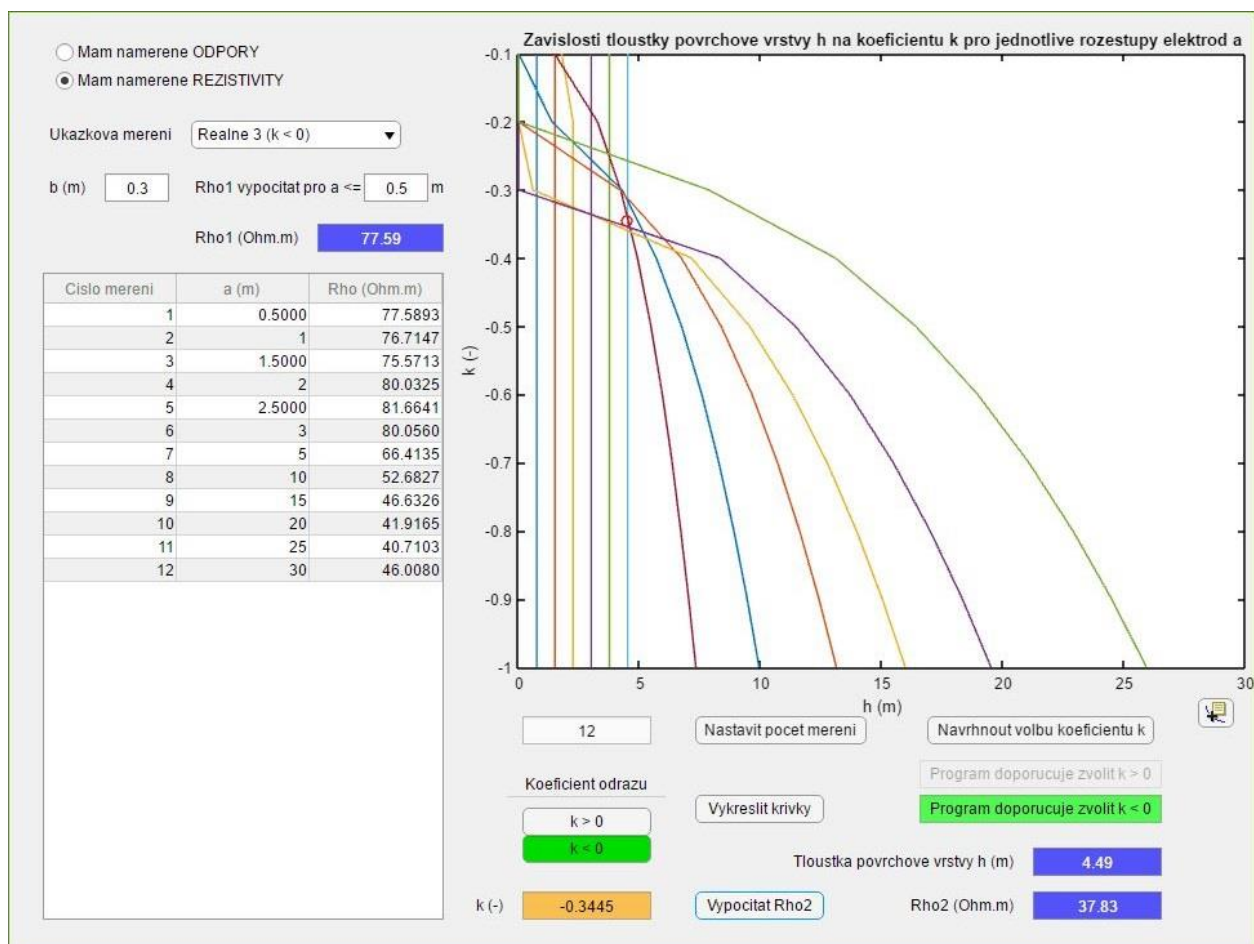
Obrázek 66: Měření 3 – OMICRON CPC 100 – GUI

V tomto případě bylo určeno, že se křivky protnuly pouze v jednom místě, viz následující tabulka.

Tabulka 29: Měření 3 – OMICRON CPC 100 – GUI

Průsečík	Rho1 (Ωm)	h (m)	k (-)	Rho2 (Ωm)
1	77,95	4,51	-0,34	38,03

9.3.4.2 PU 193



Obrázek 67: Měření 3 – PU 193 – GUI

Křivky na obrázku se protínaly na více místech, proto byla následná simulace provedena pro hodnoty průsečíků v následující tabulce.

Tabulka 30: Měření 3 – PU 193 – GUI

Průsečík	Rho1 (Ωm)	h (m)	k (-)	Rho2 (Ωm)
1	77,59	4,2	-0,3	41,88
2	77,59	6,17	-0,38	34,83

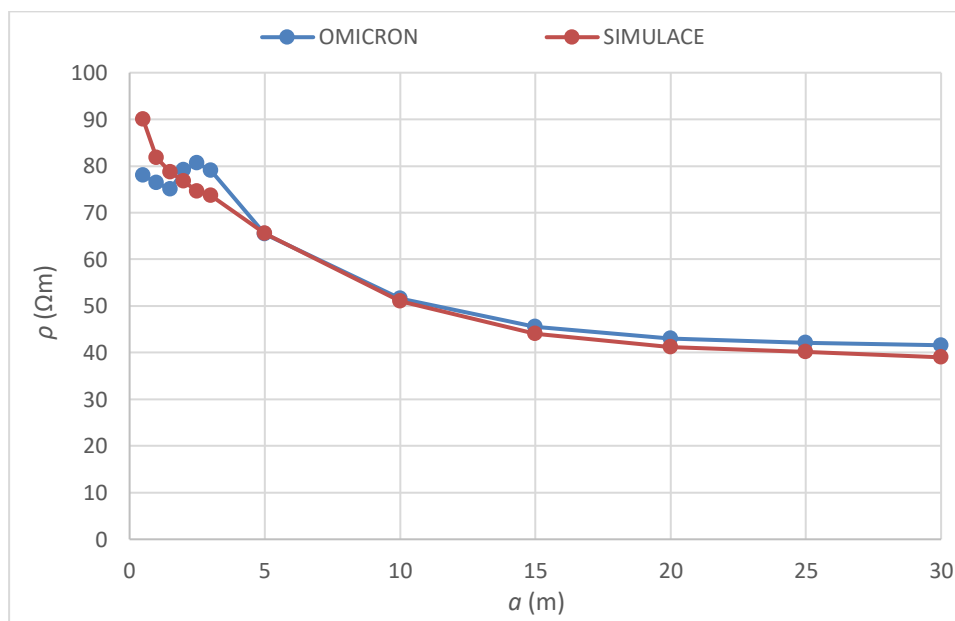
9.3.5 Výsledky simulací

V následujících tabulkách jsou uvedeny výsledné hodnoty napětí ze simulací a z nich vypočtené hodnoty rezistivit, které jsou porovnány s naměřenými hodnotami (pro OMICRON jsou to hodnoty ρ_{OM} a pro PU ρ_{sp} , jež jsou také uvedeny v tabulkách).

9.3.5.1 OMICRON CPC 100

Tabulka 31: Měření 3 – výsledky simulací – OMICRON CPC 100

$\rho_1 = 77,95 \Omega\text{m}$		$h = 4,51 \text{ m}$		$\rho_2 = 38,03 \Omega\text{m}$		
$I = 4 \text{ A}$		$b = 0,3 \text{ m}$		$r = 250 \text{ m}$		$e = 1 \%$
$a \text{ (m)}$	0,5	1	1,5	2	2,5	3
$U \text{ (V)}$	81,49	45,71	31,31	23,54	18,52	15,36
$R \text{ (}\Omega\text{)}$	20,37	11,43	7,83	5,88	4,63	3,84
$\rho_{sim} \text{ (}\Omega\text{m)}$	89,96	81,72	78,63	76,77	74,52	73,65
$\rho_{OM} \text{ (}\Omega\text{m)}$	77,95	76,44	74,99	79,11	80,61	78,99
$a \text{ (m)}$	5	10	15	20	25	30
$U \text{ (V)}$	8,29	3,24	1,87	1,31	1,02	0,83
$R \text{ (}\Omega\text{)}$	2,07	0,81	0,47	0,33	0,26	0,21
$\rho_{sim} \text{ (}\Omega\text{m)}$	65,5	51,01	44,01	41,21	40,13	39
$\rho_{OM} \text{ (}\Omega\text{m)}$	65,41	51,59	45,58	42,98	42,05	41,59



Obrázek 68: Měření 3 – výsledky simulací – OMICRON CPC 100

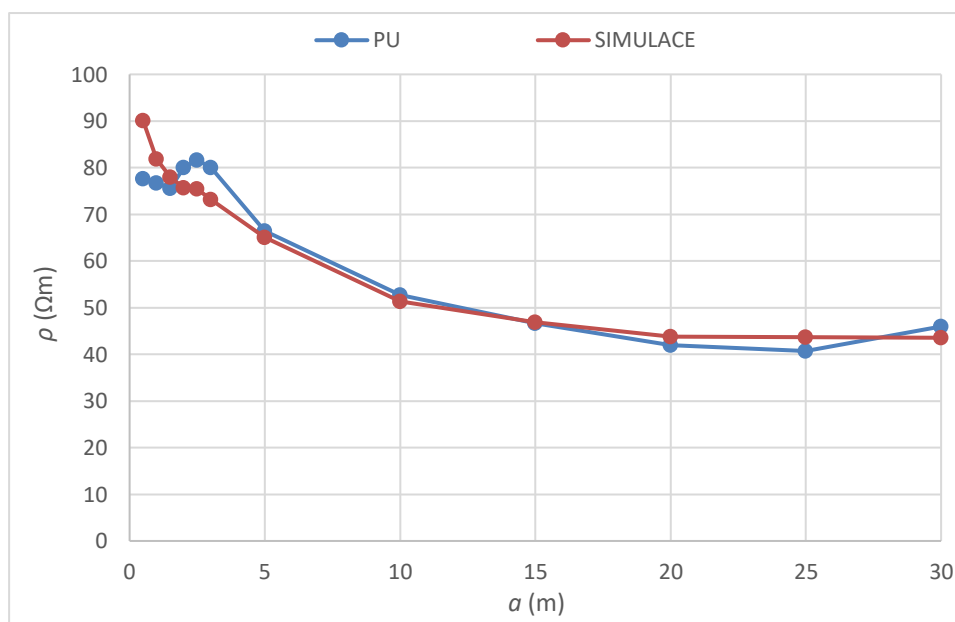
Hodnoty rezistivit ze simulací se od naměřených liší jen málo pro malé rozestupy. Pro velké rozestupy se hodnoty téměř shodují.

9.3.5.2 PU 193

Průsečík 1

Tabulka 32: Měření 3 – výsledky simulací – PU 193 – průsečík 1

$\rho_1 = 77,59 \Omega\text{m}$		$h = 4,2 \text{ m}$		$\rho_2 = 41,88 \Omega\text{m}$		
$I = 4 \text{ A}$		$b = 0,3 \text{ m}$		$r = 250 \text{ m}$		$e = 1 \%$
$a \text{ (m)}$	0,5	1	1,5	2	2,5	3
$U \text{ (V)}$	81,6	45,76	31,06	23,2	18,74	15,27
$R \text{ (}\Omega\text{)}$	20,4	11,44	7,76	5,8	4,69	3,82
$\rho_{sim} \text{ (}\Omega\text{m)}$	90,08	81,81	78	75,65	75,42	73,2
$\rho_{sp} \text{ (}\Omega\text{m)}$	77,59	76,71	75,57	80,03	81,66	80,06
$a \text{ (m)}$	5	10	15	20	25	30
$U \text{ (V)}$	8,23	3,26	1,99	1,39	1,11	0,92
$R \text{ (}\Omega\text{)}$	2,06	0,81	0,5	0,35	0,28	0,23
$\rho_{sim} \text{ (}\Omega\text{m)}$	65,05	51,28	46,82	43,8	43,72	43,55
$\rho_{sp} \text{ (}\Omega\text{m)}$	66,41	52,68	46,63	41,92	40,71	46,01



Obrázek 69: Měření 3 – výsledky simulací – PU 193 – průsečík 1

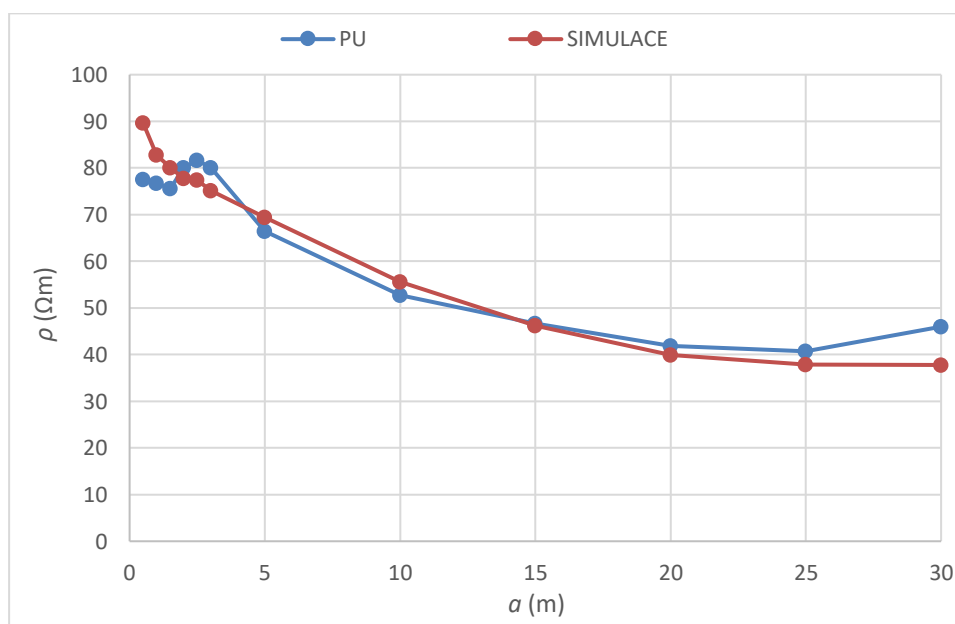
Zde je to téměř stejné jako v kapitole 0.

9 Výsledky měření a simulací

Průsečík 2

Tabulka 33: Měření 3 – výsledky simulací – PU 193 – průsečík 2

$\rho_1 = 77,59 \Omega\text{m}$		$h = 6,17 \text{ m}$		$\rho_2 = 34,83 \Omega\text{m}$		
$I = 4 \text{ A}$		$b = 0,3 \text{ m}$		$r = 250 \text{ m}$		$e = 1 \%$
$a \text{ (m)}$	0,5	1	1,5	2	2,5	3
$U \text{ (V)}$	81,22	46,31	31,87	23,84	19,23	15,68
$R \text{ (}\Omega\text{)}$	20,3	11,58	7,97	5,96	4,81	3,92
$\rho_{sim} \text{ (}\Omega\text{m)}$	89,66	82,79	80,04	77,74	77,39	75,18
$\rho_{sp} \text{ (}\Omega\text{m)}$	77,59	76,71	75,57	80,03	81,66	80,06
$a \text{ (m)}$	5	10	15	20	25	30
$U \text{ (V)}$	8,78	3,54	1,96	1,27	0,96	0,8
$R \text{ (}\Omega\text{)}$	2,19	0,88	0,49	0,32	0,24	0,2
$\rho_{sim} \text{ (}\Omega\text{m)}$	69,38	55,62	46,22	39,94	37,9	37,78
$\rho_{sp} \text{ (}\Omega\text{m)}$	66,41	52,68	46,63	41,92	40,71	46,01



Obrázek 70: Měření 3 – výsledky simulací – PU 193 – průsečík 2

Zde se hodnoty rezistivit liší jen málo pro rozestupy do 20 m. Od 20 m se již liší výrazně.

10 SROVNÁNÍ JEDNOVRSTVÉHO A DVOUVRSTVÉHO MODELU

V této kapitole je na konkrétním měření ukázáno, zda je vhodné, či nevhodné nahradit jednovrstvý model dvouvrstvým. Pro srovnání bylo zvoleno určení zemního odporu. Jako příklad bylo vybráno měření 2 – hodnoty z přístroje PU 193 z průsečíku 2.

10.1 Jednovrstvý model

V [3] v příloze J jsou uvedeny následující vztahy pro výpočet zemních odporů jednoduchých zemničů:

Kruhový zemnič:

$$R_K = \frac{\rho}{\pi^2 D} \ln \left(\frac{2\pi D}{d_k} \right) (\Omega) \quad (18)$$

kde D je průměr kruhu, jenž zemnič tvoří (m), a d_k je vlastní průměr lanového zemniče nebo polovina šířky páskového zemniče (m).

Paprskový zemnič:

$$R_P = \frac{\rho}{\pi L} \ln \left(\frac{2L}{d_p} \right) (\Omega) \quad (19)$$

kde L je délka paprskového zemniče (m) a d_k je vlastní průměr lanového zemniče nebo polovina šířky páskového zemniče (m).

Byl zvolen kruhový zemnič s průměrem kruhu $D = 5,5$ m a vlastním průměrem $d = 0,015$ m. Rezistivita je vypočtena jako průměr hodnot ρ_{sp} z tabulky 26:

$$\rho = \frac{\sum_{\check{c}m=1}^6 \rho_{\check{c}m}}{6} = \frac{1512,4 + 941,29 + 941,18 + 767,11 + 747,99 + 650,01}{6} = 926,66 \Omega m$$

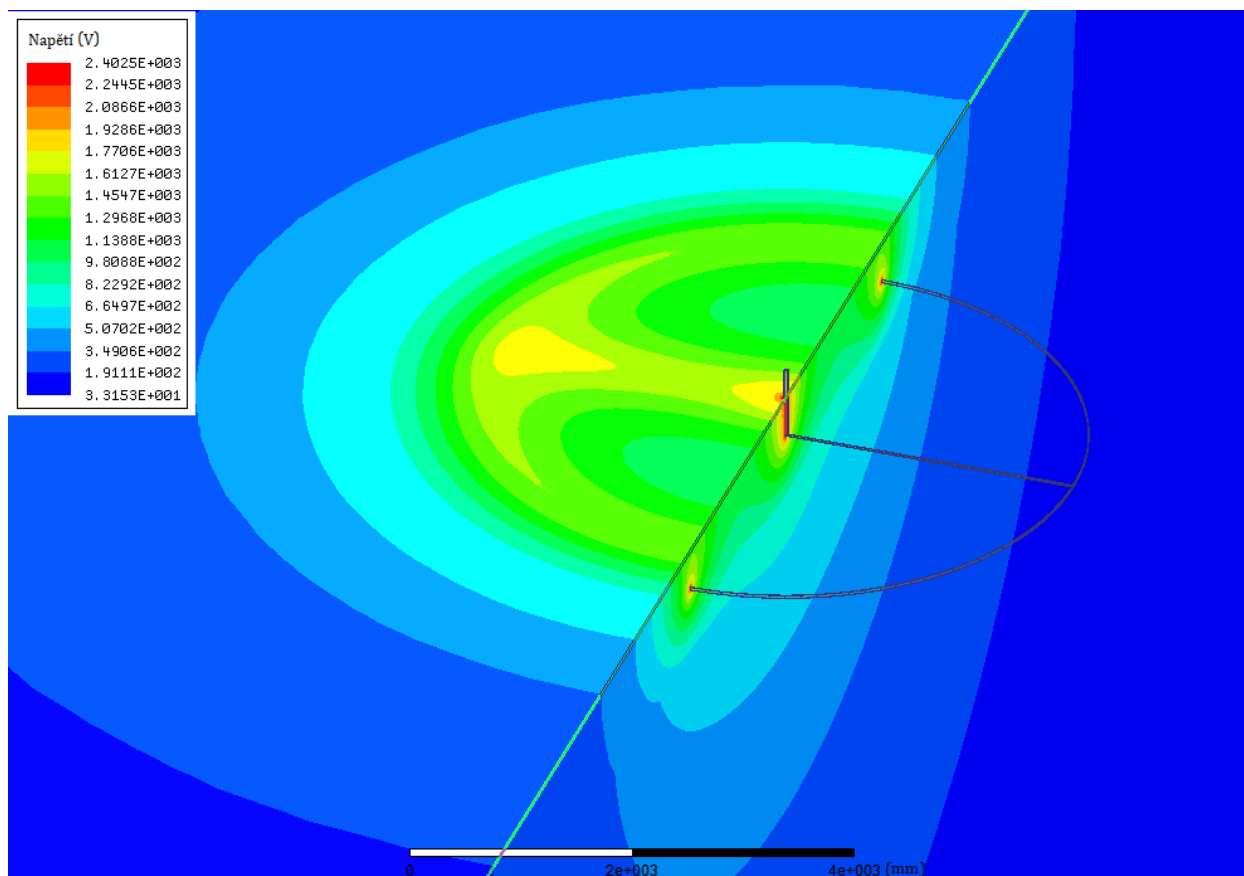
Dosazením do rovnice (18) se vypočítá odpor kruhového zemniče:

$$R_K = \frac{\rho}{\pi^2 D} \ln \left(\frac{2\pi D}{d_k} \right) = \frac{926,66}{\pi^2 5,5} \ln \left(\frac{2\pi \cdot 5,5}{0,015} \right) = 132,17 \Omega$$

10.2 Dvouvrstvý model

Pro získání hodnoty odporu zemniče byl vytvořen model zemniče v programu Ansys, který byl umístěn do dvouvrstvého modelu půdy hodnotami $\rho_1 = 1512,4 \Omega m$, $h = 1,08$ m a $\rho_2 = 332,8 \Omega m$. Proud byl nastaven na 30 A, hloubka uložení zemniče h_k byla zvolena 0,4 m a hodnoty průměrů D a d_k jsou stejné jako v kapitole 10.1. Na následujícím obrázku je rozložení elektrického pole podél zemniče.

10 Srovnání jednovrstvého a dvouvrstvého modelu



Obrázek 71: Rozložení elektrického pole kolem kruhového zemniče

Model byl vytvořen stejně jako je uvedeno v kapitole 8.1. Jediný rozdíl je v konstrukci zemniče (namísto elektrod) a hlavně ve volbě plochy pro vstup proudu do modelu a plochy, kam se proud stéká (Sink). Jako plocha, kudy proud vstupuje, je zvolena vrchní plocha části zemniče vystupujícího nad povrch a jako Sink je zvolen vnější povrch polokruhového modelu půdy.

Výsledky simulace jsou v následující tabulce.

Tabulka 34: Měření 2 – výsledky simulace kruhového zemniče – PU 193 – průřezík 2

$\rho_1 = 1512,4 \Omega\text{m}$	$h = 1,08 \text{ m}$	$\rho_2 = 332,8 \Omega\text{m}$	$r = 250 \text{ m}$
$I = 30 \text{ A}$	$e = 0,7 \%$	$h_k = 0,4 \text{ m}$	$D = 5,5 \text{ m}$
$U = 2402,5 \text{ V}$		$R = 80,08 \Omega$	

11 ZÁVĚR

Tato diplomová práce se zabývá měřením elektrické rezistivity půdy. V teoretické části je nejprve stručně vysvětleno, co je to rezistivita a co ji ovlivňuje. Dále jsou popsány různé metody, kterými se rezistivita půdy dá změřit, z nichž největší pozornost je věnována Wennerově metodě, která byla použita při měření v terénu. Je podrobněji vysvětlen její dvouvrstvý model, který byl v rámci práce vytvořen z naměřených hodnot v programu Matlab a následně simulován v programu Ansys.

Další část se zabývá popisem elektromagnetických vlastností půdy – faktorů ovlivňujících vlastnosti půdy a elektromagnetických konstant a jejich vlivem na rezistivitu, potažmo měrnou vodivost, půdy. Poté následuje kapitola věnující se dvěma měřicím přístrojům, které byly použity k měření – OMICRON CPC 100 a PU 193 – jejich zapojení, nastavení, parametrům, a nakonec byly shrnuty jejich výhody a nevýhody.

Praktická část této práce sestává nejprve z nalezení lokalit vhodných k měření rezistivity půdy. První měření bylo provedeno poblíž fakulty, kde byla možnost napájet OMICRON ze sítě pomocí prodlužovacího kabelu. Druhé měření bylo situováno pod vedení velmi vysokého napětí u Hrušovan nad Jevišovkou, kde byly očekávány vyšší hodnoty rezistivity půdy. Poslední – třetí měření bylo uskutečněno na poli z důvodu variability složení půdy. Na proběhlá měření navazuje kapitola, ve které je uveden postup měření rezistivity půdy – příprava před měřením a jeho samotný průběh. Byly zde zmíněny také praktické zkušenosti nabyté během měření.

Dále byla popsána funkcionality vytvořeného GUI pro snadné zpracování naměřených hodnot a získání parametrů dvouvrstvého modelu půdy. Jelikož výstupy z GUI jsou určovány grafickou metodou – na základě hledání průsečíků křivek, které se ne vždy protínají v jednom bodě (resp. v určitém rozmezí okolo jednoho bodu) – je mnohdy nutné ruční určení průsečíku/ů křivek. Kvůli proměnlivosti výsledků následného zpracování simulací je autorem této práce doporučeno vybrat, pokud možno, více nežli jeden průsečík a jemu odpovídající výsledky poté podrobit dalšímu zkoumání. GUI bude používáno pro potřeby ústavu, pod jehož záštitou vznikla tato práce.

Další, významnou součástí této práce je simulování měření dvouvrstvé půdy v programu Ansys a následné srovnání s naměřenými hodnotami, na jejichž základě byl dvouvrstvý model určen. Výsledky simulací do značné míry závisí na určení průsečíku křivek v GUI (jak již bylo zmíněno výše), proto bylo v této práci vybráno celkem 12 průsečíků z 6 měření. (Měření oběma přístroji byla vyhodnocována zvlášť.)

Výsledky prvního měření (na uměle vytvořeném náspu) ukázaly, že měřená půda je v rozsahu proměřené hloubky v daném směru poměrně homogenní – naměřené hodnoty rezistivity se pohybují v řádech pouze několik desítek Ωm . Překvapivý je fakt, že oba přístroje naměřily při větších rozestupech (nad 15 m) odlišné výsledky, ačkoli pro každý rozstup byla půda změřena oběma přístroji bez toho, aby se během přepojování přístrojů změnilo uspořádání elektrod. Pouze byly přepojeny kabely z jednoho přístroje do druhého. Tato odchylka je možná z důvodu chybného měření jednoho z přístrojů při takto nízkých rezistivitách. Srovnání výsledků simulací s naměřenými hodnotami u OMICRONu dopadlo příznivě. U PU se však výsledky pro velké rozestupy velmi liší.

Výsledky druhého měření (štěrkopísčité půdy) potvrdily předpoklad, že hodnoty rezistivity zde budou vyšší než u běžné hlíny. Půda zde vykazovala značnou nehomogenitu. V celém rozsahu rozestupů se hodnoty rezistivity lišily o více než 1 000 Ωm . I zde se vyskytl fenomén velké rozdílnosti naměřených rezistivit u obou přístrojů pro velké rozestupy (nad 20 m). U OMICRONu jsou velké výkyvy ve shodě mezi výsledky měření a simulace. Při některých rozestupech se hodnoty téměř shodují, ale při jiných se liší někdy až o 500 Ωm . U PU je to podobné, ale záleží zde na volbě průsečíku křivek v GUI. Zatímco u OMICRONu se vyskytují velké výkyvy pro oba průsečíky, u PU je to pro jeden průsečík podobné, ale u druhého se již hodnoty spolu poměrně shodují.

Půda z třetího měření (obdělávané pole) vykazuje, podobně jako první půda, rovněž velkou homogenitu. Hodnoty rezistivity se zde pohybují v řádech desítek Ωm a pouze u tohoto měření bylo oběma přístroji dosaženo takřka stejných výsledků. Liší se až hodnoty pro největší rozestup 30 m. Hodnoty ze simulace se s těmi změřenými také liší jen málo, a to jak pro OMICRON, tak pro PU (zde dokonce u obou určených průsečíků).

Simulování v programu Ansys je tedy možné. Je zde však problém s určováním průsečíku křivek. Výsledky simulací jsou podobné výsledkům měření, ale má to určité limitace. Je nutno posoudit případ od případu.

Nakonec byl proveden výpočet zemního odporu kruhového zemniče pro jednovrstvý model (pro konkrétní hodnoty z měření 2), který byl srovnán s odporem určeným simulací modelu kruhového zemniče ve dvouvrstvé půdě. Pro jednovrstvý model je odpor 132,17 Ω a pro dvouvrstvý 80,08 Ω . Tento rozdíl svědčí o vhodnosti náhrady jednovrstvého modelu půdy dvouvrstvým. Dvouvrstvý model respektuje nehomogenitu půdy, proto je přesnější a jeho použití má výrazný vliv na určení zemního odporu zemniče. Dvouvrstvý model půdy je tedy s výhodou uplatnitelný v praxi.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] KOČVARA, Antonín. *Uzemňování elektrických zařízení*. Praha: IN-EL, 1995. Knižnice Elektro.
- [2] ČSN 33 2000-5-54 ed. 3. *Elektrické instalace nízkého napětí – Část 5–54: Výběr a stavba elektrických zařízení – Uzemnění a ochranné vodiče*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.
- [3] ČSN EN 50522. *Uzemňování elektrických instalací AC nad 1kV*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
- [4] PNE 33 0000-1. *Ochrana před úrazem elektrickým proudem v distribučních soustavách a přenosové soustavě: Podniková norma energetiky pro rozvod elektrické energie*. 5. vydání. ÚJV Řež, a. s. divize Energoprojekt Praha, Ing. Jaroslav Bárta, ČEZ Distribuce, a. s. Ing. Pavel Kraják, ČENES Václav Macháček a Ing. Václav Schamberger. 2011, 89 s.
- [5] WENNER, Frank. *A method of measuring earth resistivity* [online]. Washington: National Bureau of Standards, 1916, s. 469-471 [cit. 2018-01-02]. Dostupné z: <https://archive.org/details/met124694781916258258unse>
- [6] OSOLSOBĚ, Jan a Mirko ZAPLETAL. *Zemnění a bezpečnost*. Praha: Československá akademie věd, 1964, 792 s.
- [7] TAGG, George Frank. *Earth resistances*. London: G. Newnes, 1964, 258 s.
- [8] IEEE STD 81™-2012. *Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance and Earth Surface Potentials of a Grounding System*. New York, USA: IEEE Power and Energy Society. 2012, s. 22–26 [cit. 2018-05-09]. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6392181>
- [9] OMICRON electronics GmbH. *CPC 100 Reference Manual: Primary test system for substation equipment commissioning and maintenance*. [online]. 5. vydání. 2005, 366 s [cit. 2018-05-12]. Dostupné z: https://www.myprotectionguide.com/uploads/7/3/0/1/73017921/cpc_100_reference_manual.pdf
- [10] Metra Blansko PU 193. *Návod k používání: Měření zemních odporů*. [online]. 2005, 18 s [cit. 2018-05-12]. Dostupné z: https://www.revizeshop.cz/fotky29448/fotov/ps_83Pristroje_pro_revize_a_telekomunikace-NPU193-web.pdf
- [11] *Electrical characteristics of the surface of the Earth*. Report 229-6 [online]. 1990, 7 s [cit. 2018-01-08]. Dostupné z: https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-P.229-6-1990-PDF-E.pdf
- [12] *INTERSUCHO: Nasycení půdního profilu* [online]. Ústav výzkumu globální změny AV ČR: Czech Globe, Mendelova univerzita v Brně, Státní pozemkový úřad, 2018 [cit. 2018-05-11]. Dostupné z: <http://www.intersucho.cz/cz/mapy/nasyceni-pudniho-profilu/?mapcountry=eu>

- [13] HÁJKOVÁ, Jindřiška. *Měření a výpočty teplotních charakteristik a teplota půdy* [online]. Institute of Landscape Ecology: Mendel University of Agriculture and Forestry Brno, 2016, 62 s [cit. 2018-05-12]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/15049229-Mereni-a-vypocty-teplotnich-charakteristik-teplota-pudy.html>
- [14] STERNBERG, Ben K. a Tsylya M. LEVITSKAYA. *Electrical parameters of soils in the frequency range from 1 kHz to 1 GHz, using lumped-circuit methods*. Radio Science [online]. 2001, 36(4), s. 709-719 [cit. 2018-01-08]. DOI: 10.1029/1999RS002232. ISSN: 00486604. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1029/1999RS002232>
- [15] SCOTT, James H. *Electrical and magnetic properties of rock and soil*. Report 83-915 [online]. Denver: U.S. Department of the Interior Geological Survey, 1983, 44 s [cit. 2018-01-08]. Dostupné z: <https://pubs.usgs.gov/of/1983/0915/report.pdf>
- [16] ORSÁGOVÁ, Jaroslava. *Elektrické stanice a vedení*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektroenergetiky, 2017, s 80.
- [17] MathWorks. *Curve intersections*. 24. 9. 2010 [online]. [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/22441-curve-intersections>
- [18] Půdní mapa 1:50 000. Česká geologická služba. [online]. [cit. 2018-05-18]. Dostupné z: <https://mapy.geology.cz/pudy/>
- [19] Google Maps. [online]. [cit. 2018-05-18]. Dostupné z: <https://www.google.cz/maps/>

PŘÍLOHY

Příloha A: Měření 1 – Brno – Královo Pole

Příloha B: Měření 2 – Hrušovany nad Jevišovkou – Pravice

Příloha C: Měření 3 – Hustopeče nad Bečvou – Vysoká

Příloha D: Vybavení pro měření rezistivity

Příloha A: Měření 1 – Brno – Královo Pole

Tabulka 35: Měření 1 – kompletní naměřené hodnoty a vypočtené rezistivity

b (m)		OMICRON CPC 100						PU 193	
0,3		I = 4 A						I = max. 40 mA	
čm	a (m)	f (Hz)	I_{RMS} (mA)	V_{RMS} (V)	R (Ω)	X (mΩ)	ρ_{OM} (Ωm)	ρ_{PU} (Ωm)	ρ_{sp} (Ωm)
1	0,5	128	724,8	5,03±0,33	6,94	39,61	30,65	21,6	30,36
		378	566,8	3,92±0,27	6,91	31,98	–	–	–
2	1	128	696	2,66±0,05	3,82	32,01	27,29	23,8	27,09
		378	538,4	2,05±0,47	3,8	31,05	–	–	–
3	1,5	128	625,6	1,56±0,19	2,5	-8,23	25,04	23	24,52
		378	486,8	1,21±0,07	2,49	-2,96	–	–	–
4	2	128	685,1	1,24±0,26	1,8	8,07	23,53	22	22,84
		378	535,2	0,96±1,22	1,8	38,2	–	–	–
5	2,5	128	687,1	0,97±0,39	1,41	9,7	22,81	21,5	22,03
		378	535,4	0,76±1,59	1,41	39,17	–	–	–
6	3	128	695,5	0,81±0,53	1,16	10,81	22,34	20,7	21,06
		378	542,9	0,63±2,01	1,16	40,79	–	–	–
7	5	128	701,6	0,43±1,09	0,66	12,53	20,77	18,83	18,95
		378	544,8	0,358±3,74	0,66	42,85	–	–	–
8	10	128	738,2	0,22±3,07	0,3	16,35	19,19	15,54	15,56
		378	575,1	0,18±9,73	0,3	52,13	–	–	–
9	15	128	679,9	0,13±6,47	0,1	20,64	17,17	10,93	10,94
		378	530,8	0,11±19,11	0,18	62,9	–	–	–
10	20	128	642,7	0,08±10,44	0,13	23,12	15,78	4,78	4,78
		378	502,8	0,07±28,8	0,13	69,12	–	–	–
11	25	128	691,6	0,07±15,34	0,1	26,69	15,29	1,81	0,43
		378	537,2	0,07±38,64	0,1	78,58	–	–	–
12	30	128	709,9	0,06±20,2	0,8	29,71	15,23	0,43	0,43
		378	553,4	0,307±46,41	0,8	86,3	–	–	–

Tabulka 36: Měření 1 – měření frekvenční závislosti přístrojem OMICRON CPC 100

b (m)		OMICRON CPC 100					
0,3							
\check{m}	a (m)	I_{test} (A)	f (Hz)	I_{RMS} (mA)	V_{RMS} (V)	R (Ω)	X (mΩ)
0	1	1	128	376	1,51 \angle -1,22	4,04	-86,21
		2	15	130,1	0,53 \angle -0,4	4,08	-28,39
		2	37	291,8	1,18 \angle -0,6	4,06	-42,62
		2	73	471	1,9 \angle -0,85	4,05	-59,74
		2	128	497,9	2,01 \angle -1,24	4,04	-87,24
		2	178	458,5	1,85 \angle -1,6	4,03	-112,7
		2	238	350,2	1,41 \angle -2,04	4,03	-143,4
		2	278	289,6	1,17 \angle -2,33	4,03	-164,1
		2	378	205,3	0,83 \angle -3,07	4,03	-216
		4	128	525,9	2,12 \angle -1,23	4,04	-86,88
		6	128	533,9	2,16 \angle -1,23	4,04	-86,8
		6	378	473,9	1,91 \angle -3,03	4,03	-213,5

Příloha B: Měření 2 – Hrušovany nad Jevišovkou – Pravice

Tabulka 37: Měření 2 – kompletní naměřené hodnoty a vypočtené rezistivity

b (m)		OMICRON CPC 100						PU 193	
0,3		I = 4 A						I = max. 40 mA	
čm	a (m)	f (Hz)	I_{RMS} (mA)	V_{RMS} (V)	R (Ω)	X (Ω)	ρ_{OM} (Ωm)	ρ_{PU} (Ωm)	ρ_{sp} (Ωm)
1	0,5	128	18,33	6,26∠-3	340,87	-17,89	1505,23	1076	1512,43
		378	14,57	5,03∠-7,86	341,7	-47,2	–	–	–
2	1	128	14,34	2,05∠-2,22	143,16	-5,54	1023,81	827	941,29
		378	11,37	1,82∠-9,8	157,94	-27,27	–	–	–
3	1,5	128	15,61	1,39∠-2,77	89,24	-4,32	896,43	883	941,18
		378	21,23	1,26∠-12,37	100,36	-22,01	–	–	–
4	2	128	19,47	1,14∠-2,61	58,58	-2,68	764,06	739	767,11
		378	15,32	1∠-10,14	64,16	-11,48	–	–	–
5	2,5	128	17,84	0,84∠-2,77	47,27	-2,29	760,81	730	747,99
		378	14,03	0,8∠-12,98	55,63	-12,82	–	–	–
6	3	128	20,29	0,66∠-3,24	32,37	-1,83	620,67	639	650,01
		378	16,31	0,47∠-4,42	28,64	-2,22	–	–	–
7	5	128	24,19	0,25∠-0,04	10,16	-6,65	321,25	378	380,37
		378	19,86	0,13∠63,43	2,89	5,78	–	–	–
8	10	128	28,85	0,07∠1,39	2,53	0,06	159,31	256	256,4
		378	23,76	0,16∠126,57	3,94	5,31	–	–	–
9	15	128	23,59	0,06∠2,86	2,42	0,12	228,65	265	265,19
		378	18,84	0,04∠16,67	2,23	0,67	–	–	–
10	20	128	15,36	0,01∠25,94	0,81	0,4	102,72	298	298,12
		378	12,66	0,08∠120,23	3,26	5,66	–	–	–
11	25	128	11,9	0,06∠-16,16	4,93	-1,43	774,11	270	270,07
		378	9,33	0,26∠-51,93	16,95	-21,58	–	–	–
12	30	128	13,39	0,04∠-11,57	2,69	-0,55	506,48	302	302,05
		378	10,67	0,13∠-46,18	8,21	-8,54	–	–	–

Tabulka 38: Měření 2 – měření frekvenční závislosti přístrojem OMICRON CPC 100

b (m)		OMICRON CPC 100				
0,3		I = 4 A				
čm	a (m)	f (Hz)	I_{RMS} (mA)	V_{RMS} (V)	R (Ω)	X (Ω)
11	25	73	11,08	0,03∠-6,29	2,76	-0,3
		95	12,01	0,04∠-9,71	3,5	-0,6
		121	11,93	0,05∠-15,13	4,6	-1,24
		178	11,63	0,7∠-24,51	7,55	-3,44
		273	10,89	0,18∠-38,3	12,82	-10,15

Příloha C: Měření 3 – Hustopeče nad Bečvou – Vysoká

Tabulka 39: Měření 3 – kompletní naměřené hodnoty a vypočtené rezistivity

b (m)		OMICRON CPC 100						PU 193	
0,3		I = 4 A						I = max. 40 mA	
čm	a (m)	f (Hz)	I_{RMS} (A)	V_{RMS} (V)	R (Ω)	X (mΩ)	ρ_{OM} (Ωm)	ρ_{PU} (Ωm)	ρ_{sp} (Ωm)
1	0,5	128	0,27	4,78±0,5	17,65	-154,1	77,95	55,2	77,59
		378	0,21	3,74±0,76	17,60	-234,9	–	–	–
2	1	128	0,28	3,03±0,45	10,69	-84,38	76,44	67,4	76,71
		378	0,23	2,43±0,55	10,48	-102,5	–	–	–
3	1,5	128	0,3	2,26±0,48	7,47	-62,06	74,99	70,9	75,57
		378	0,23	1,7±0,63	7,46	-81,43	–	–	–
4	2	128	0,31	1,9±0,44	6,06	-46,6	79,11	77,1	80,03
		378	0,25	1,49±0,43	6,04	-45,5	–	–	–
5	2,5	128	0,24	1,22±0,51	5,01	-44,45	80,61	79,7	81,66
		378	0,2	0,96±0,7	5,01	-61,41	–	–	–
6	3	128	0,28	1,14±0,53	4,12	-37,84	78,99	78,7	80,06
		378	0,22	0,89±0,8	4,13	-57,86	–	–	–
7	5	128	0,28	0,57±0,44	2,07	-15,91	65,41	66	66,41
		378	0,22	0,47±0,85	2,1	-31,09	–	–	–
8	10	128	0,41	0,34±0,15	0,82	2,13	51,59	52,6	52,68
		378	0,32	0,29±0,68	0,9	-1,08	–	–	–
9	15	128	0,49	0,23±1,77	0,48	14,95	45,58	46,6	46,63
		378	0,38	0,2±3,02	0,54	28,8	–	–	–
10	20	128	0,52	0,18±4,06	0,34	24,27	42,98	41,9	41,92
		378	0,41	0,16±9,48	0,34	62,43	–	–	–
11	25	128	0,54	0,15±6,47	0,27	30,37	42,05	40,7	40,71
		378	0,42	0,12±17,27	0,28	87,6	–	–	–
12	30	128	0,5	0,11±10,16	0,22	39,55	41,59	46	46,01
		378	0,39	0,1±26,48	0,23	11,47	–	–	–

Tabulka 40: Měření 3 – měření frekvenční závislosti přístrojem OMICRON CPC 100

b (m)		OMICRON CPC 100				
0,3		I = 4 A				
čm	a (m)	f (Hz)	I_{RMS} (A)	V_{RMS} (V)	R (Ω)	X (mΩ)
12	30	95	0,52	0,12±17,53	0,22	29,2
		173	0,49	0,11±13,53	0,22	53,4
		227	0,47	0,11±17,34	0,22	69,9
		273	0,45	0,10±20,35	0,23	83,7
		323	0,43	0,10±23,41	0,23	98,6

Příloha D: Vybavení pro měření rezistivity

- Elektrocentrála (alespoň 3 kW)
- Dostatek propojovacích vodičů (i s odkrývatelnými kontakty)
- Prodlužovací kabel s více zásuvkami
- Multimetr pro kontrolu napájecího napětí
- Kladivo
- Rukavice
- Špagát o délce alespoň 3a (aby byly elektrody v přímce)
- Svinovací metr nebo pásma nebo digitální rolmetr (pro měření rozestupů)
- Mačeta / sekera (pro odstraňování porostu)
- Kempingový stolek
- Podložka na psaní + papíry na zaznamenávání naměřených hodnot